

ACF - INTERNATIONAL

UTILISATION DU SYSCAL

DANS LE CADRE DE MISSIONS DE PROSPECTION GÉOPHYSIQUE



UTILISATION DU SYSCAL

DANS LE CADRE DE MISSIONS DE PROSPECTION GÉOPHYSIQUE

Ce rapport technique a été rédigé dans le cadre d'un projet de *"recherche opérationnelle"* financé conjointement par l'organisation non-gouvernementale humanitaire *Action contre la Faim, la Croix Rouge Française* et le *Ministère des Affaires Etrangères.*







Nous tenons à remercier toutes ces organisations et institutions pour avoir rendu ce travail possible.

INFORMATIONS LÉGALES

DÉCLARATION CONCERNANT LES DROITS D'AUTEUR

CLAUSE DE NON-RESPONSABILITÉ

Le présent document vise à promouvoir l'accès du public aux informations relatives à ses initiatives et aux politiques d'Action contre la Faim en général. Notre objectif est de diffuser des informations exactes et à jour à la date de création. Nous nous efforcerons de corriger les erreurs qui nous seront signalées. Toutefois, ACF n'assume aucune responsabilité quant aux informations que contient le présent document.

Ces informations :

- sont exclusivement de nature générale et ne visent pas la situation particulière d'une personne physique ou morale ;
- ne sont pas nécessairement complètes, exhaustives, exactes ou à jour ;
- renvoient parfois à des documents ou sites extérieurs sur lesquels ACF n'a aucun contrôle et pour lesquels ACF décline toute responsabilité ;
- ne constituent pas de manière exhaustive un avis juridique.

La présente clause de non-responsabilité n'a pas pour but de limiter la responsabilité d'ACF de manière contraire aux exigences posées dans les législations nationales applicables ou d'exclure sa responsabilité dans les cas où elle ne peut l'être en vertu des dites législations.

Cet ouvrage a été rédigé par le Dr Johan Hoareau (ACF), sous la supervision de Dr Jean Lapegue (ACF), et avec la collaboration d'Isabelle Livovschi, dans le cadre des activités de la Direction Scientifique et Technique ACF-France.

Conception graphique : Céline Beuvin
Photo de couverture : © Jean Lapegue
Achevé d'imprimer en juin 2010 sur les presses de Cap Impression - 9, rue Salvador Allende - Z.I. des Glaises - 91120 Palaiseau
Imprimé sur papier recyclé Cyclus Print
Dépôt légal : Juin 2010

INTRODUCTION

Ce document n'est pas un cours de géophysique ! Il s'adresse aux géophysiciens devant réaliser des mesures de prospection électrique à l'aide du Syscal R1 Plus Switch 72 fabriqué par Iris Instruments. Son but est de donner à son utilisateur quelques bases et quelques conseils pour lui permettre de réaliser des mesures fiables avec cet appareil et à les interpréter correctement.
Pour plus de détails sur la technique, on peut se reporter au livre *Eau, assainissement et hygiène pour les populations à risque* (2006) édité par Action contre la Faim, au Cours Online de Géophysique *(http://www-ig.unil. ch/cours/index.htm)* de l'Université de Lausanne (dont ce document s'inspire fortement), et aux documents techniques édités par Iris Instruments sur leur site web *(http://www.iris-instruments.com/index.html).* L'organisation du document suit trois parties :

1. La première partie présente les définitions des principaux termes employés, les notions de résistivité électrique et les techniques de mesure utilisées.

2. La seconde partie est centrée sur l'appareil Syscal R1 Plus, son mode de fonctionnement et son utilisation.

3. La troisième partie présente quelques exemples de résultats de prospections électriques réalisées à l'aide de cet appareil. D'autres exemples peuvent être trouvés dans les rapports de mission ACF ou sur le web.

Notons toutefois que ce document n'est pas supposé se substituer au manuel d'utilisation du Syscal, qui reste le document de référence pour cet appareil. Quelques documents techniques intéressants et édités par Iris Instruments sont présentés en Annexe.

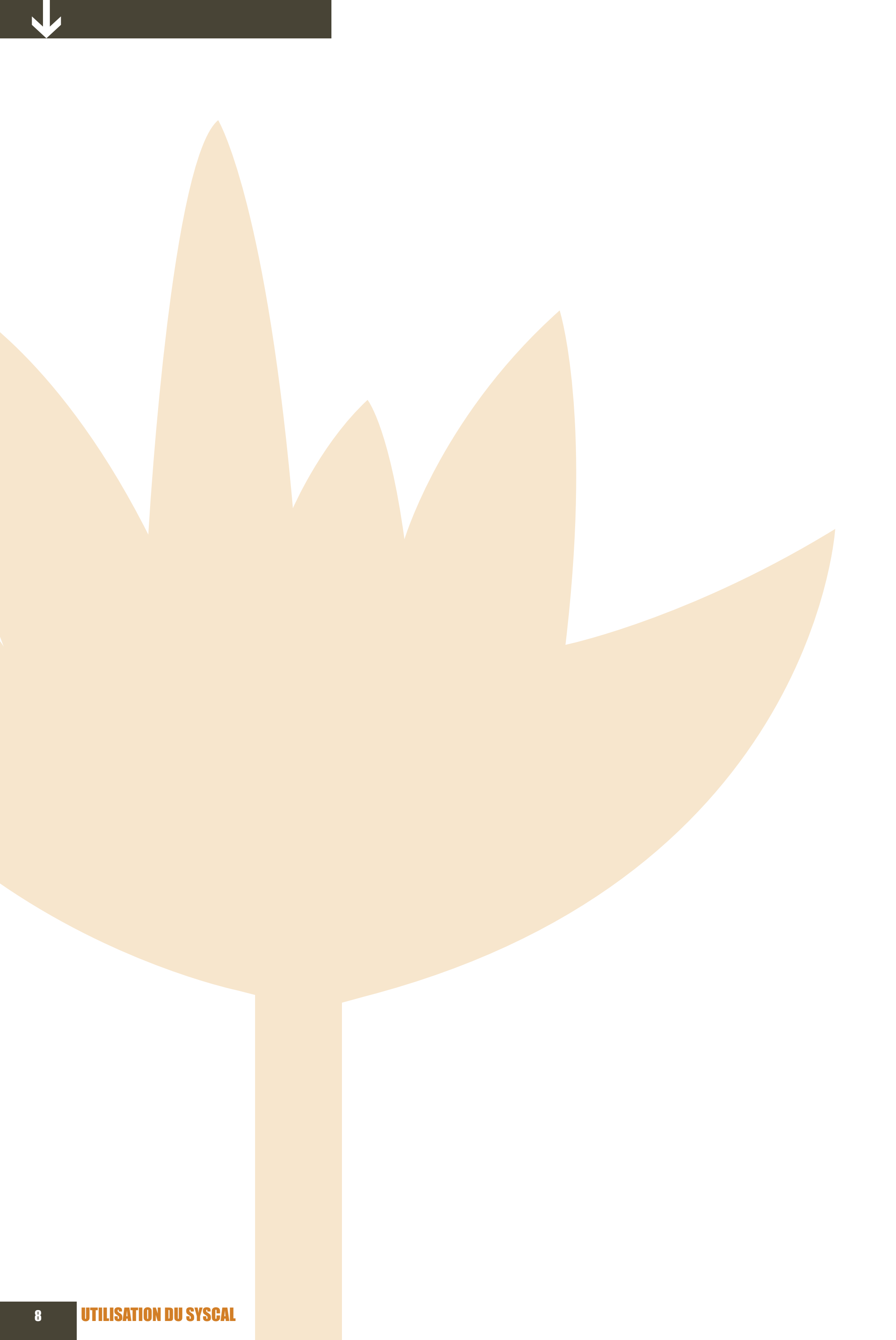


Table des matières



Chapitre 1
PRINCIPE GÉNÉRAL



GÉNÉRALITÉS

L'objectif d'une prospection électrique est de déterminer la distribution des valeurs de résistivité électrique du sous-sol à partir de mesures réalisées en surface du sol. Dans le cadre de ce document, nous nous intéresserons à deux techniques de prospection :

- la technique de sondage électrique, utilisée pour l'étude des terrains présentant des variations de résistivité électrique avec la profondeur uniquement (en une dimension, ou 1D) ;
- la technique de panneau électrique, appelée également imagerie (ou tomographie) de résistivité électrique, pour l'étude des terrains présentant des variations de résistivité électrique en deux dimensions (2D, avec la profondeur et suivant une direction définie).

MESURES EFFECTUÉES

LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

La résistivité électrique d'un matériau, exprimée en Ωm, représente la capacité de ce matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique. Elle représente l'inverse de la conductivité électrique σ, exprimée en S/m.
A l'exception des minéraux métalliques, des argiles hydratées ou du graphite, les minéraux constitutifs des formations géologiques présentent majoritairement des résistivités importantes (Kirsch, 2006). Pour cette raison, la circulation de courant électrique dans le sous-sol s'effectue principalement par conduction électrolytique à travers l'eau contenue dans ces formations. Ainsi, la résistivité électrique d'une formation géologique ne contenant pas de minéraux conducteurs dépend essentiellement (McNeill, 1980) :

- de la quantité d'eau présente (de la porosité) ;
- de la distribution de cette eau (la connectivité des pores) ;
- de la minéralisation de cette eau (de sa qualité).

En conséquence, connaître la distribution des valeurs de résistivité dans le sous-sol peut permettre de distinguer les formations géologiques présentes à travers la quantité d'eau qu'elles contiennent ou la qualité de cette eau, informations précieuses dans le cadre d'une étude hydrogéologique.

TECHNIQUES DE MESURE

La résistivité électrique ρ d'une formation peut être déduite de la résistivité apparente ρa, une grandeur calculée à partir de la mesure de la différence de potentiel ΔV (en volts) entre deux électrodes M et N pendant l'injection d'un courant continu I (en ampères) entre deux autres électrodes A et B (Figures 1.1 et 1.2).
Cette résistivité apparente ρa dépend alors de la disposition des électrodes et de la répartition des résistivités dans le sous-sol.

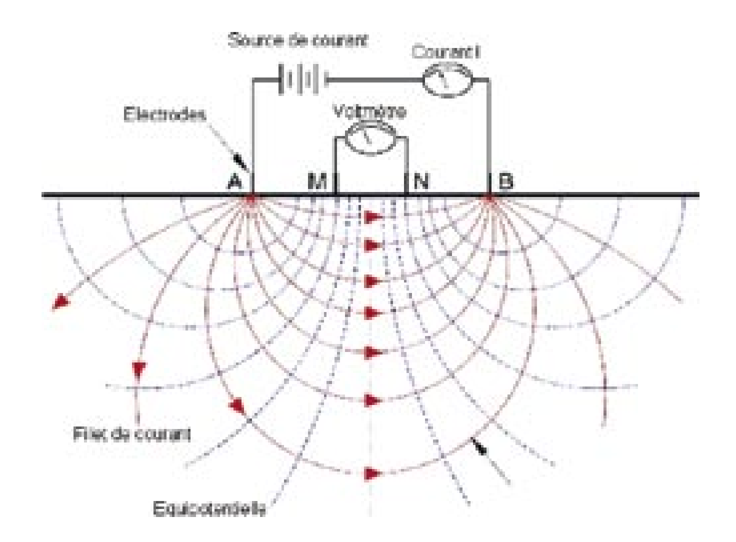


Figure 1.1 – Mesure de la différence de potentiel entre les électrodes M et N pendant l'injection de courant entre les électrodes A et B dans un terrain de résistivité ρ. Attention à la simplification de l'image : les filets de courant ne sont pas compris dans un plan vertical uniquement (Figure 1.2).

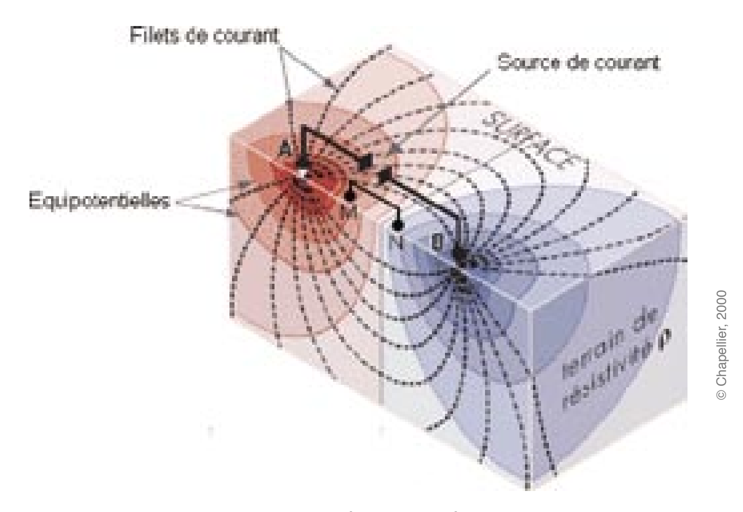


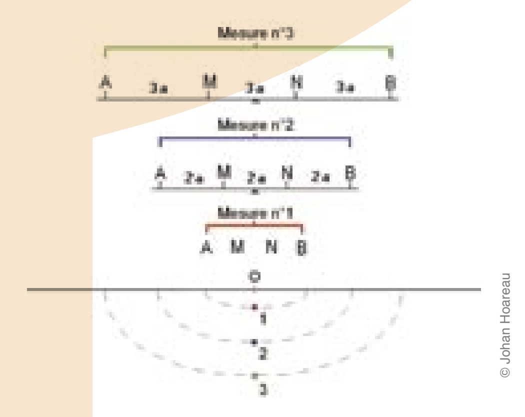
Figure 1.2 – Illustration représentant les équipotentielles et filets de courant dans un terrain de résistivité ρ.

Elle s'exprime selon : $\rho a \qquad K = \frac{\Delta V}{I}$

où K est un coefficient géométrique (m) dépendant de la disposition des électrodes de courant (A et B) et de potentiel (M et N). Différents arrangements géométriques ou « dispositifs » sont possibles pour ces quatre électrodes, chacun présentant une certaine sensibilité à la façon dont varie la résistivité au sein du milieu étudié (Dahlin et Zhou, 2004 ; Loke, 2004).
La profondeur d'investigation des deux techniques décrites dans les sections ci-dessous augmente avec les dimensions du dispositif utilisé : plus l'écartement entre les électrodes augmente, plus la mesure concerne des terrains profonds. Cette augmentation de la profondeur s'accompagne toutefois d'une baisse de résolution, qui peut être conséquente pour les terrains profonds.

En une dimension : le sondage électrique

La réalisation d'un sondage électrique consiste à réaliser des mesures de résistivité apparente *ρa* en faisant varier l'écartement des électrodes de courant et de potentiel (les dimensions du dispositif de mesure) par rapport à un point central fixe (Figure 1.3). Les différentes mesures fournissent alors une courbe de sondage de la résistivité apparente en fonction des dimensions du dispositif (pseudo-profondeur). Cette courbe est ensuite interprétée en considérant que les variations de résistivité électriques dans le terrain étudié ne se font qu'en une dimension (hypothèse 1D) pour obtenir la variation de résistivité en fonction de la profondeur.
Cette technique, efficace et simple à mettre en place, fournit une information en profondeur à partir d'une interprétation 1D des mesures. Elle est donc très sensible aux variations latérales de résistivité du sous-sol, qui ne sont pas prises en compte lors de l'interprétation. Elle n'est donc réservée qu'aux terrains tabulaires ne présentant pas de variations de résistivité significatives à l'horizontale dans la zone étudiée. Pour étudier les milieux à deux (ou trois) dimensions, le panneau électrique (ou le couplage de plusieurs panneaux) est plus approprié.



© Johan Hoareau

Figure 1.3 – Principe d'un sondage électrique (dispositif Wenner Alpha).

En deux dimensions : le panneau électrique

Le panneau électrique (appelé également imagerie de résistivité électrique ou tomographie de résistivité électrique) correspond à une succession de sondages électriques réalisés les uns à côté des autres. Pour cela, un réseau d'électrodes est installé le long d'un profil rectiligne avec un espacement constant *a* (Figure 1.4), choisi de façon à optimiser la longueur du profil, la profondeur d'investigation et la résolution désirée (Chapellier, 2000). Les mesures sont présentées sous forme de pseudo-section de résistivité apparente en fonction de la position le long du profil et de la pseudo-profondeur.

Ces deux techniques sont classiquement utilisées pour définir les structures et la géométrie du milieu souterrain. Leur simplicité et leur faible coût les rendent populaires en milieu côtier (Urish et Frohlich, 1990 ; Frohlich et al., 1994 ; Wilson et al., 2006 ; Vouillamoz et al., 2007), de socle (Larsson, 1984 ; Durand, 2005 ; Dewandel et al., 2006 ; Descloitres et al., 2008), ou karstique (Vouillamoz et al., 2003 ; Chalikakis, 2006).

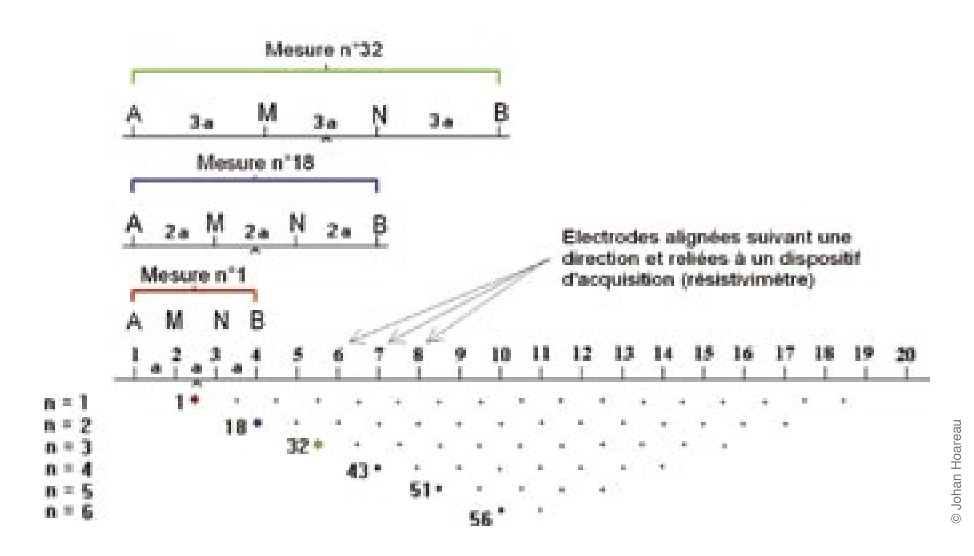


Figure 1.4 – Principe d'un panneau électrique (dispositif Wenner Alpha), modifié d'après Loke (2004).

DISPOSITIFS DE MESURE

La réalisation d'une mesure nécessite de choisir préalablement un dispositif d'acquisition, c'est à dire une géométrie pour les électrodes. Chaque dispositif est caractérisé par une certaine profondeur d'investigation et un certain pouvoir de résolution. Sans rentrer dans le détail, nous donnerons ici les grandes caractéristiques des dispositifs principaux utilisés en prospection.

Dispositif Wenner Alpha

Le dispositif Wenner Alpha (Figure 1.5) est recommandé pour l'étude des terrains présentant des structures horizontales, comme les terrains stratifiés, mais est peu sensible à la présence de structures verticales fines (comme un dyke par exemple). La profondeur d'investigation et le nombre de points à l'acquisition sont inférieurs à ceux des dispositifs Dipôle-Dipôle et Wenner-Schlumberger, en particulier sur les bords du profil (Chapellier, 2000).

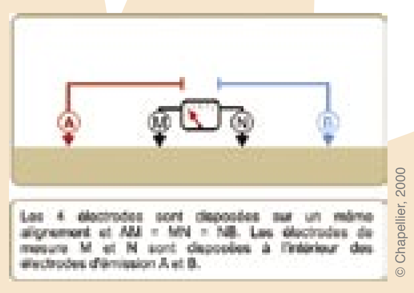


Figure 1.5 – Dispositif Wenner Alpha.

Dispositif Wenner-Schlumberger

L'emploi du dispositif Wenner-Schlumberger (Figure 1.6) est recommandé pour les terrains présentant à la fois des structures horizontales et verticales. La profondeur d'investigation obtenue est plus élevée qu'avec le Wenner Alpha, et le nombre de points à l'acquisition est plus important. C'est un dispositif généralement peu bruité.

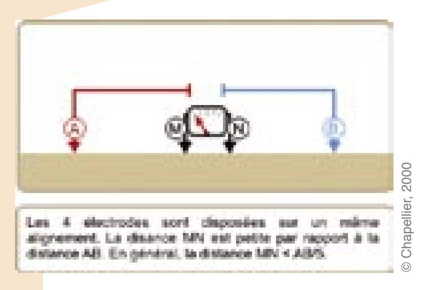


Figure 1.6 – Dispositif Wenner Schlumberger.

Dispositif Dipôle-Dipôle

Le dispositif Dipôle-Dipôle (Figure 1.7) est recommandé surtout pour l'étude des terrains présentant des structures verticales (dyke, contact vertical entre deux formations). Il est sensible aux structures horizontales (comme les terrains présentant une stratification horizontale). Sa profondeur d'investigation est plus grande que pour les dispositifs Wenner Alpha et Wenner-Schlumberger. Le nombre de points d'acquisition est également plus important (Chapellier, 2000).

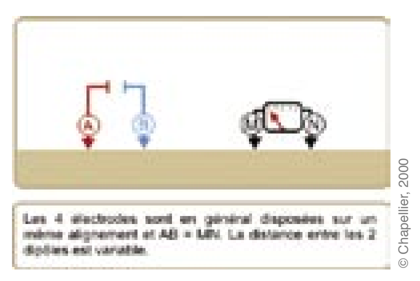


Figure 1.7 – Dispositif Dipôle-Dipôle.

Le dispositif Wenner Beta (Figure 1.8) est un cas particulier du dispositif Dipôle-Dipôle.

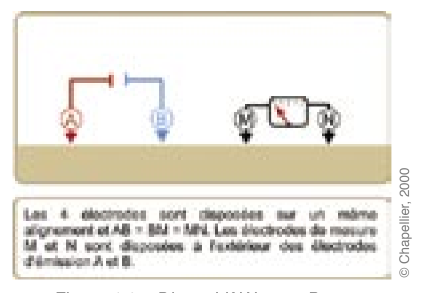


Figure 1.8 – Dispositif Wenner Beta.

Dispositif Pôle-Dipôle

Le dispositif Pôle-Dipôle (Figure 1.9) est un dispositif asymétrique, dû au placement d'une des électrodes de courant « à l'infini » (à une grande distance du point de mesure). La profondeur d'investigation obtenue est plus importante que celle obtenue avec le dispositif Dipôle-Dipôle. Toutefois, ce dispositif tend à être sensible au bruit.

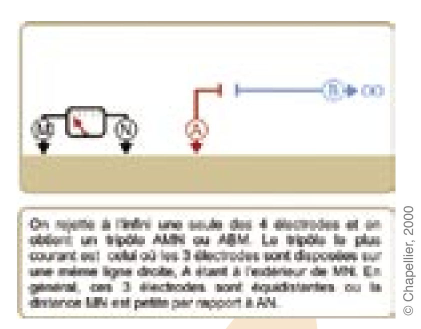


Figure 1.9 – Dispositif Pôle-Dipôle.

Dispositif Pôle-Pôle

Dans le cas du dispositif Pôle-Pôle (Figure 1.10), deux électrodes (une de courant et une de potentiel) sont mises à l'infini. Ce dispositif présente la profondeur d'investigation la plus grande et un nombre de points d'acquisition important. Toutefois, sa résolution est faible, et il tend à être très sensible au bruit ambiant.

Le choix du (ou des) dispositif(s) à employer pour l'étude d'un terrain repose donc sur :

- le type de structure que l'on cherche à définir (une stratification horizontale ou un contact vertical par exemple) ;
- la profondeur de cette structure ;
- les caractéristiques du profil (longueur, nombre d'électrodes) ;
- le bruit ambiant.

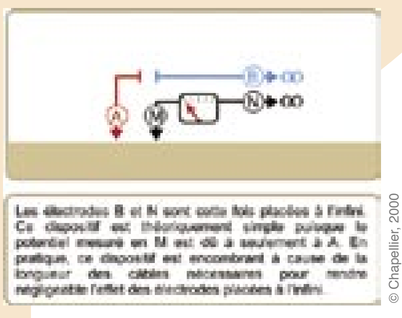


Figure 1.10 – Dispositif Pôle-Pôle.

INTERPRÉTATION DES MESURES

PRINCIPE

L'interprétation des sondages ou panneaux électriques consiste à définir – à l'aide d'une procédure d'inversion – un modèle de structure du sol (résistivité en fonction de la profondeur) qui puisse reproduire les données mesurées. En d'autres termes, il s'agit de convertir les résistivités apparentes obtenues avec les mesures réalisées en surface en résistivité « vraies » du sous-sol sous la forme d'un modèle mathématique de structure du sol. Cette opération est aujourd'hui effectuée de manière routinière par des logiciels spécialisés, pour les sondages (Figure 1.11) et pour les panneaux (Figure 1.12).

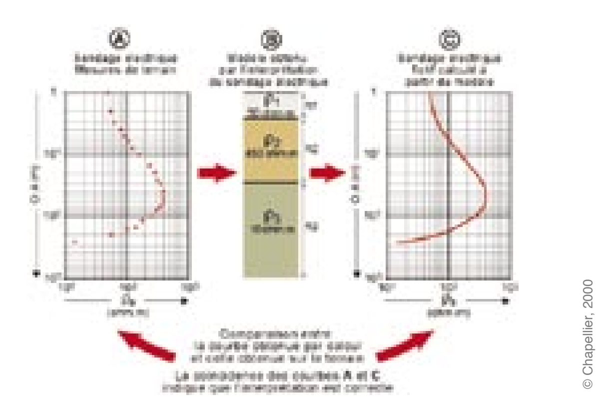


Figure 1.11 – Principe de l'interprétation d'un sondage électrique par méthode itérative (Chapellier, 2000).

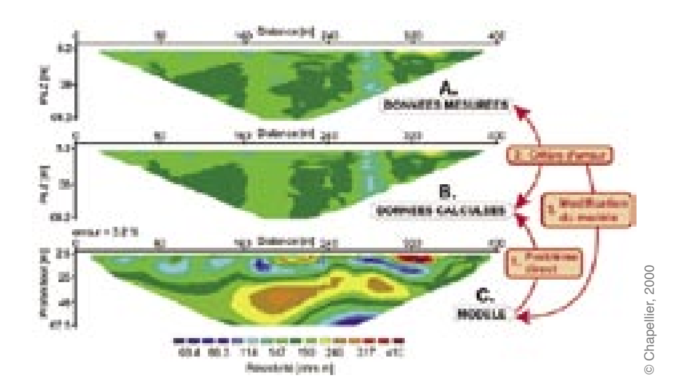


Figure 1.12 – Principe de l'interprétation d'un panneau électrique par méthode iterative (Chapellier, 2000).

Les différentes étapes des interprétations présentées Figures 1.11 et 1.12 peuvent être détaillées (Chapellier, 2000) :

1. Un modèle (C) est tout d'abord élaboré soit à partir des données de résistivités apparentes mesurées (A), soit à partir d'informations fournies par l'utilisateur.
2. L'algorithme calcule ensuite la réponse de ce modèle en y effectuant une « acquisition fictive », le problème direct (c'est à dire le calcul de résistivités apparentes à partir des résistivités vraies) étant connu (étape 1). On obtient alors le profil calculé (B).
3. L'algorithme détermine alors le degré de différence entre les données mesurées (A) et le profil calculé (B) selon un certain critère (étape 2). Le modèle est ensuite modifié dans le but de diminuer le degré de différence (erreur) entre (A) et (B) (étape 3). L'opération est alors répétée de manière itérative jusqu'à ce que le processus converge (c'est à dire que l'erreur ne diminue plus de manière significative).

LIMITES DE L'INTERPRÉTATION

Principe d'équivalence

La solution définie par ce processus d'inversion n'est pas unique : lors de l'interprétation d'un sondage électrique, plusieurs modèles de structure du sol (résistivité/épaisseur) différents peuvent reproduire aussi bien une même mesure. Cette indétermination est illustrée en premier lieu par la notion d'équivalence, qui est particulièrement forte dans le cas où une couche conductrice fine est située entre deux couches résistantes. Dans ce cas, seul le rapport $\Delta z/\rho$ de cette couche (la conductance longitudinale) pourra être déterminé. De la même manière, pour une formation résistante fine située entre deux formations conductrices, seule la résistance transversale $\Delta z/\rho$ sera définie. Il existera donc une infinité de couples (Δzi ; ρi) permettant de caractériser ces couches. L'estimation de la résistivité des terrains profonds est également sujette à une certaine indétermination, due à un manque de résolution en profondeur.

Toutes ces solutions équivalentes ne sont toutefois que des solutions mathématiques : certaines peuvent être très différentes, voire complètement aberrantes par rapport à la structure du terrain étudié. La sélection du modèle « correct » parmi ces solutions nécessite donc des connaissances a priori sur le terrain étudié, ou l'acquisition d'informations complémentaires permettant de contraindre cette interprétation.

Notion de suppression

L'indétermination peut également être illustrée par la notion de suppression, qui masque les terrains ne présentant pas un contraste de résistivité suffisant par rapport aux formations avoisinantes. De manière générale, lorsqu'on ne dispose pas d'information a priori, on cherche à définir le modèle résistivité/épaisseur le plus simple possible pour interpréter des mesures. Si l'on dispose d'informations provenant d'un log de forage par exemple, celles-ci doivent obligatoirement être prises en compte dans l'interprétation.

Contact avec le milieu

Enfin, ces deux techniques sont basées sur une injection de courant dans le sol à partir d'un contact entre une électrode et le milieu étudié. Ceci peut s'avérer problématique dans le cas où le milieu en surface est fortement résistant, comme le sable sec ou très dur, comme une roche saine affleurante. Il est toutefois possible d'améliorer le contact entre l'électrode et le milieu dans certains cas en utilisant différentes techniques qui seront présentées dans la partie suivante. Dans le cas où aucune amélioration n'est possible, l'utilisation de techniques de prospection électromagnétiques (sans contact avec le sol) peut s'avérer plus pratique.



Chapitre 2

LE SYSCAL R1 PLUS SWITCH 72



Introduction

Le Syscal R1 Plus Switch 72 est un résistivimètre permettant l'utilisation d'un réseau de 72 électrodes au maximum. Il est constitué d'une unité centrale combinant les fonctions d'injection de courant et de mesure de la différence de potentiel engendrée (Figure 2.1). Les électrodes sont reliées à cette unité par le biais de câbles spéciaux (câbles multiélectrodes) branchés directement au dos de l'appareil (les câbles jaunes des Figures 2.1 et 2.2).

La configuration de l'appareil pour la réalisation d'une mesure se fait en deux temps : dans un premier temps à l'aide d'un ordinateur et de logiciels spécialisés qui permettent de définir une séquence de mesure (qui indique à l'appareil les différentes mesures qu'il doit effectuer), puis, une fois la séquence transférée dans la mémoire de l'appareil, avec le clavier de l'appareil lui-même.

Une fois correctement paramétré et connecté, cet appareil joue différents rôles :

- le rôle de multinode, qui lui permet de reconnaître chacune des électrodes connectée aux câbles (leur emplacement, leur ordre) ;
- le rôle de multiplexeur, afin d'attribuer un rôle à chaque électrode au fur et à mesure du déroulement de l'acquisition ;
- le rôle de résistivimètre, afin d'injecter le courant et de mesurer la différence de potentiel ;
- le rôle de batterie afin d'assurer l'injection et la mesure.



Figure 2.1 – Syscal R1 Plus Switch 72 avec bobines d'enroulement.



Figure 2.2 – Façade supérieure du Syscal R1 Plus Switch 72 et des connexions des câbles multiélectrodes sur la façade arrière.

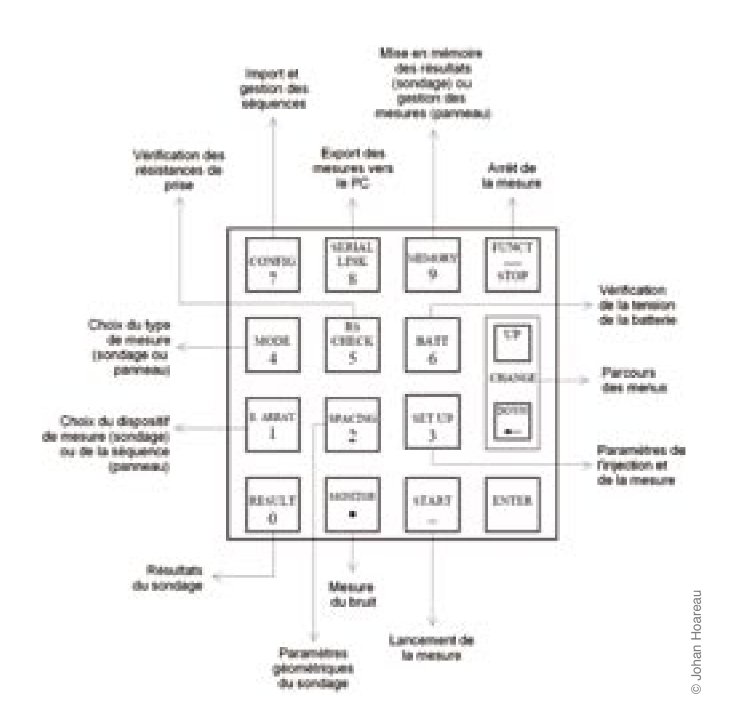


Figure 2.3 – Clavier du Syscal et description des différentes fonctions.

Ce rassemblement des différentes fonctions permet de réduire la quantité d'équipement nécessaire sur le terrain, et de simplifier grandement les connexions des électrodes à l'unité centrale. De plus, cet appareil dispose d'un système d'ajustement automatique du courant qui lui permet de sélectionner le courant d'injection permettant une mesure correcte de différence de potentiel tout en préservant la batterie.
L'appareil est piloté sur le terrain à l'aide d'un clavier en place sur la face supérieure (Figure 2.3). La première opération à réaliser avant toute chose est de vérifier la charge des batteries de l'appareil (une pour l'injection de courant et l'autre pour la réception), à l'aide du bouton BATT. Celle-ci doit être comprise entre 50 et 100 % pour assurer la réalisation d'une mesure. Une batterie de voiture (12 V) peut être connectée à l'appareil pour remplacer la batterie interne d'injection si celle-ci est déchargée.

RÉALISATION D'UN PANNEAU ÉLECTRIQUE

La réalisation d'un panneau électrique avec cet appareil nécessite l'accomplissement de différentes étapes, qui seront décrites dans les sous-sections suivantes. Si l'on devait résumer, il s'agit de préparer un profil rectiligne (le plus rectiligne possible !) permettant l'installation de l'équipement et la réalisation des mesures. Parmi les étapes principales, nous distinguerons :

1. La préparation du matériel nécessaire
2. La sélection du profil de mesure
3. La préparation de la (des) séquence(s) de mesure
4. La préparation du profil
5. La mise en place des électrodes
6. Les connexions des câbles multiélectrodes aux électrodes et au Syscal
7. La mise en route et la vérification des connexions
8. Le lancement de la mesure
9. La fin de la mesure et le rangement du matériel

Notons également que les différents paramètres du profil (opérateur, lieu, date, heure, direction, nombre d'électrodes, séquence utilisée...) doivent être rapportés avec soin sur une fiche de mesure appropriée.
En fonction des caractéristiques du terrain et du nombre d'électrodes employées, la mise en place du profil peut prendre un temps important (plusieurs heures). La mesure elle-même dure de 30 à plus de 60 minutes pour 72 électrodes. Lors de la préparation de la journée de terrain, il peut être bon de penser à se réserver du temps pour répéter une mesure au cas où celle-ci aurait été perturbée (Par exemple, il nous est arrivé que des personnes débranchent 12 électrodes sans nous prévenir, pendant la mesure, pour passer avec une voiture).

PRÉPARATION DU MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Le matériel à prévoir pour la réalisation de mesure peut être constitué des éléments suivants :

- le Syscal avec ses câbles multiélectrodes, des électrodes et les différents câbles de connexion (électrodes/câbles et Syscal/PC) ;
- un ordinateur portable de terrain ;
- une boussole de visée ;
- des machettes et des gants pour la réalisation des layons ;
- des décamètres, de préférence longs (100 mètres) et non métalliques ;
- des marteaux pour la mise en place des électrodes ;
- des chambres à air de vélo usagées (pour réaliser des connexions entre le câble multiélectrode et les électrodes) et des ciseaux ;
- du câble électrique en cuivre (pour remplacer une connexion) ;
- du scotch d'électricien ;
- une batterie 12 volts (chargée) afin de remplacer la batterie interne de l'appareil lorsque celle-ci est déchargée ;
- un voltmètre ;
- une bombe d'air sec (utilisée pour le nettoyage des ordinateurs normalement) afin de nettoyer les différentes connectiques ;
- du matériel de topographie ;
- une table, des chaises et de quoi s'abriter (parasol ou bâches, la mesure peut être longue, ensoleillée voire pluvieuse) ;
- de quoi écrire, un carnet de terrain et des fiches de mesure ;
- de l'eau pour arroser les électrodes (au cas où), mais aussi pour boire.

En termes de logiciels, la combinaison des programmes suivants (ou de leur équivalent) est indispensable :

- le logiciel Electre II (Iris Instruments, gratuit) pour la création des séquences de mesure ;
- le logiciel Prosys II (Iris Instruments, gratuit) pour la récupération des mesures et leur traitement ;
- un logiciel d'interprétation des mesures comme Res2dInv (Geotomo Software, payant) ;
- le pilote de connexion entre le PC et le Syscal (Iris Instruments).

Ces logiciels doivent être installés sur le PC utilisé lors des mesures de terrain, et une copie de sauvegarde doit être archivée dans le logiciel au cas où. Il peut être bien d'avoir également les logiciels suivants (qui sont tous payants) :

- X2Ipi (Moscow State University) qui permet de combiner des profils, de créer des séquences, de traiter les données mesurées ;
- Surfer (Golden Software) qui permet de représenter facilement les sections de résistivité interprétées.

SÉLECTION DU PROFIL DE MESURE

La technique de panneau électrique permet d'étudier des terrains présentant des variations de résistivité électrique en deux dimensions : avec la profondeur et suivant une direction. Toutefois, la direction dans laquelle le profil est mis en place est importante : en effet, l'utilisation de la technique de panneau électrique implique que la résistivité ne varie pas dans la direction perpendiculaire au panneau.

On retiendra alors que la direction du profil doit être perpendiculaire à la direction des structures que l'on souhaite imager. Ainsi, en présence d'un contact vertical entre deux formations géologiques (Figure 2.4), on orientera le profil perpendiculairement à la direction de ce contact. Orienter le profil parallèlement au contact reviendrait à ne plus respecter les hypothèses sur lesquelles repose cette méthode, et à obtenir des résultats difficilement interprétables.

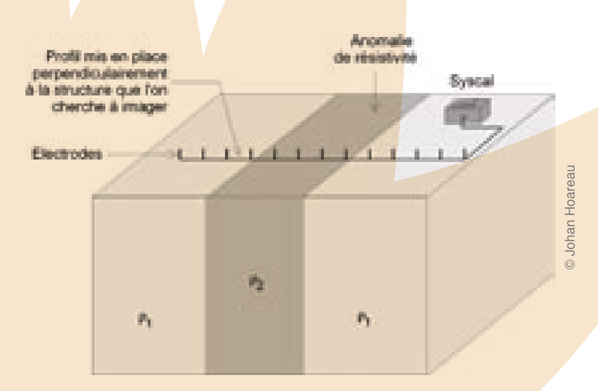


Figure 2.4 – Positionnement correct d'un panneau électrique par rapport à une structure à imager.

PRÉPARATION DE LA SÉQUENCE DE MESURE

La séquence de mesure doit être préparée à l'aide de logiciels spécialisés, comme le logiciel Electre II (Iris Instruments) ou le logiciel X2IPI (Moscow State University). L'utilisateur y spécifie différents paramètres :

- le type de câble multiélectrode (le nombre de prises d'électrode pour chaque câble) ;
- le nombre d'électrodes ;
- l'espacement inter-électrodes ;
- le dispositif à utiliser ;
- les paramètres de la mesure (nombre de répétitions (stacks), durée d'injection, erreur acceptable, mode de mesure).

Le détail de ces opérations est traité dans le manuel pas-à-pas du Syscal (Annexe B), et ne sera pas traité en détail dans ce rapport. Un nombre de répétitions minimum de 3 et maximum de 6 permet d'assurer généralement une bonne vérification des mesures, avec une erreur acceptable *q* égale à zéro.
Notons simplement que la communication entre l'ordinateur et le Syscal n'est possible que lorsque le pilote de communication « PC-Syscal » est installé sur l'ordinateur. Sans ce pilote (disponible sur le site web d'Iris Instruments ou sur les CDs qui accompagnent l'appareil), aucune communication n'est possible.

PRÉPARATION DU PROFIL

La préparation du profil sur le terrain est une étape importante de la réalisation des mesures. En forêt, ou en présence de hautes herbes, et plus généralement en cas de non-visibilité, un layon doit être préparé. Il convient alors de dégager suffisamment d'espace pour que l'installation des électrodes, la mise en place et le rangement des câbles soient possibles, et que la circulation le long du profil soit aisée (Figure 2.5). Lorsque la visibilité le permet (profil le long d'un chemin rectiligne par exemple), ce travail peut être fortement réduit (Figure 2.6, à comparer avec la Figure 2.7).



Figure 2.5 – Exemple de layon en zone non-dégagée pour la réalisation d'un panneau électrique (fait à la machette).

La direction de ce profil doit être définie soigneusement à la boussole de visée, pour être le plus rectiligne possible. En fonction de la longueur désirée (égale au nombre total d'électrodes moins une multiplié par l'espacement inter-électrodes choisi), un ou plusieurs décamètres seront nécessaires pour définir la position des extrémités du profil et des électrodes à mettre en place.



© Mathilde Grammare

Figure 2.6 – Autre exemple de layon en zone dégagée, avec une connexion d'électrode (en orange) et le câble multiélectrode (jaune) au premier plan.



© Mathilde Grammare

Figure 2.7 – Autre exemple de layon en forêt.
Chaque piquet représente la position d'une électrode à installer.

Une possibilité est de définir un point du profil (le centre ou une extrémité par exemple), de planter une électrode à laquelle seront attachés le(s) décamètre(s), et de tendre ces derniers dans la direction du profil.

MISE EN PLACE DES ÉLECTRODES ET DES CÂBLES

Une fois le profil prêt, et les décamètres en place, les électrodes peuvent être mises en place aux emplacements définis par l'espacement inter-électrodes. Celles-ci doivent être enfoncées suffisamment pour assurer un bon contact avec le sol, en particulier si le sol est électriquement résistant (sol sec par exemple). Une procédure automatisée permet de vérifier si le contact est correct pour la réalisation de la mesure.

Une fois les électrodes en place, les câbles multiélectrodes peuvent être déroulés et mis en place. Pour cela, une personne déroule le câble multiélectrode en marchant tandis qu'une personne tient la bobine. La première personne marche jusqu'à atteindre la dernière électrode à brancher sur ce câble (par exemple, la 12ème pour un câble de 12 prises), puis revient vers son point de départ en positionnant les prises du câble multiélectrode au niveau de chaque électrode, tout en prenant soin d'arranger les longueurs de câble de façon à ce qu'elles ne gênent pas.

Une attention particulière doit être portée au maniement des câbles multiélectrodes : ceux-ci sont fragiles, et coûteux. Ainsi, ils ne doivent surtout pas être déroulés en tirant par la prise de fin. En effet, la connexion entre le câble et cette prise est la partie la plus fragile du câble multiélectrode.

CONNEXIONS

Connexion des électrodes aux câbles multiélectrodes

Une fois le système mis en place, plusieurs solutions existent pour la connexion des câbles multiélectrodes aux électrodes :

- dans le cas où l'on dispose de connexions de type « pince crocodile », chaque électrode peut être connectée au câble multiélectrode par le biais de ces pinces (Figure 2.8). Ces connectiques sont très pratiques et rapides à utiliser, mais présentent l'inconvénient de s'arracher facilement lorsqu'elles sont accrochées par un pied ou un équipement que l'on déplace ;
- dans le cas contraire, la connexion peut être réalisée en utilisant des bandes de caoutchouc découpées dans des chambres à air usagées, qui permettent, à la manière d'un élastique, de plaquer l'électrode sur la prise du câble multiélectrode (Figure 2.9). L'avantage de la chambre à air est qu'elle permet une bonne connexion tout en étant remplaçable facilement, et se défait moins facilement que les pinces crocodiles.

Ainsi, même si l'on dispose des pinces crocodiles, il est important d'avoir dans l'équipement de terrain quelques chambres à air au cas où une serait égarée. De la même façon, la connexion câble/électrode peut être réalisée à l'aide d'un morceau de câble électrique et du scotch d'électricien, mais cela est moins solide.

Une fois le matériel mis en place, mais également au cours de la mesure, une attention particulière doit être portée au maintien des connexions entre les électrodes et les câbles multiélectrodes. Attention également à bien respecter l'ordre des électrodes et des prises du câble multiélectrodes (de ne pas sauter une électrode ou une prise).



© Johan Hoareau

Figure 2.8 – Connexion d'une électrode au câble multiélectrode à l'aide d'une « pince crocodile ». Bien que facilement débranchables, ces connectiques permettent de repérer les électrodes facilement (couleur orange).



© Rémi Clément

Figure 2.9 – Connexion d'une électrode au câble multiélectrode à l'aide d'un morceau de chambre à air.

Connexion des câbles multiélectrodes entre eux

Entre chaque câble multiélectrodes, une boite de jonction doit être installée (Figure 2.10). Celle-ci permet de relier deux câbles, et jusqu'à trois câbles avec le Syscal Switch 72 (jusqu'à un maximum de 36 électrodes, soit trois câbles de 12 électrodes).
On peut conseiller de ne connecter ces boîtes de jonction qu'après avoir vérifié l'intégralité de l'installation (qu'aucune prise n'a été oubliée, que les électrodes sont bien connectées, etc...). Comme il s'agit de manipuler les prises des câbles multiélectrodes, ces connexions doivent être réalisées avec soin. Bien vérifier qu'il n'y a pas d'humidité ou de corps étranger au niveau des prises, car cela pourrait les endommager. Il peut être bon de nettoyer les connectiques avec une bombe d'air sec avant les branchements.



Figure 2.10 – Boîte de jonction entre deux câbles multiélectrodes (attention au maniement des prises des câbles multiélectrodes, il s'agit de la partie la plus fragile du câble).

Connexion des câbles multiélectrodes au Syscal

La position du Syscal dans le profil doit être définie lors de la préparation de la séquence d'acquisition. En effet, les deux prises arrières du Syscal contrôlent certaines électrodes bien définies : les électrodes 1 à 36 pour la prise gauche, et 37 à 72 pour la prise droite (Photo 2.11). Ainsi, la numérotation des électrodes, et donc la façon dont est construite la séquence de mesure, doit tenir compte de la position de la façon dont les câbles multiélectrodes sont connectés au Syscal.
Pour réaliser un panneau de 72 électrodes avec six câbles multiélectrodes comportant chacun 12 prises, trois devront être connectés entre eux à l'aide de boîte de jonction et branchés à gauche, les trois autres également connectés entre eux seront branchés à droite (Figure 2.11). Cette configuration n'est cependant valable que pour le Syscal Switch 72, pour lequel ce rapport est réalisé.

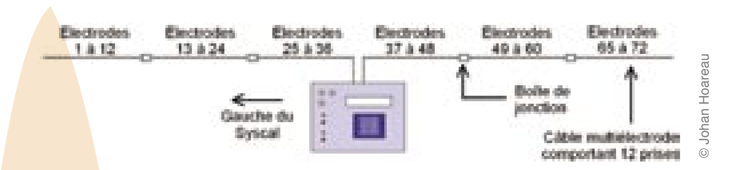


Figure 2.11 – Numérotation des électrodes en fonction des câbles utilisés.

Pour réaliser un panneau de 36 électrodes, différentes configurations sont possibles, en fonction des numéros d'électrodes indiqués lors de la création de la séquence. Ces différentes possibilités sont présentées Figure 2.12.

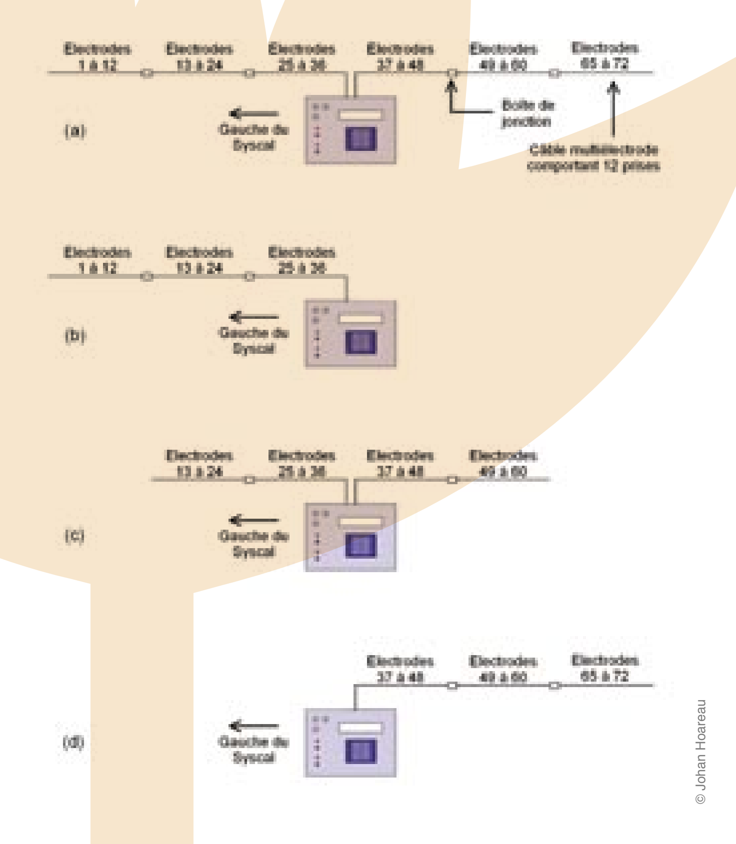


Figure 2.12 – Exemples de configurations possibles du Syscal pour un panneau réalisé avec 36 électrodes et numérotation des électrodes associée par l'appareil de manière automatique.

MISE EN ROUTE ET LANCEMENT DE LA MESURE

Vérification des résistances de prise

Une fois l'installation terminée (Figure 2.13), une vérification des connexions du dispositif de mesure et des résistances de prise est nécessaire. Une procédure automatisée est disponible, pendant laquelle l'appareil vérifie le contact entre chaque couple d'électrode à l'aide d'une fonction appelée RS-CHECK. Cette fonction mesure la résistance de prise entre deux électrodes et donne la valeur pour un couple d'électrode en *kΩ*. Pour que la mesure puisse être réalisée, une résistance de prise inférieure à 5 kΩ est nécessaire.

Si la valeur affichée est supérieure, cela peut être réglé de différentes façons :

- si la valeur affichée est très instable, vérifier que l'électrode « défectueuse » est bien branchée au câble multiélectrode, ou que le câble multiélectrode est bien branché au Syscal (cela arrive...) ;
- vérifier que l'électrode est suffisamment enfoncée dans le sol (quelques coups de marteau suffisent généralement pour réduire la résistance de prise) ;
- si le sol est trop résistant, arroser l'électrode au niveau de sa connexion avec le terrain avec de l'eau salée ;
- doubler les électrodes peut également permettre de réduire significativement la résistance de prise.



Figure 2.13 – Exemple de branchement du Syscal : on aperçoit la boîte de jonction au premier plan, le câble multiélectrode mis en place (jaune), le décamètre (en blanc) et le Syscal en arrière plan. Ce profil est réalisé avec un écartement entre les électrodes très faibles (50 cm).

Vérification au cours de la mesure

Lors d'une mesure, l'appareil sélectionne un quadripôle électrique, injecte le courant et mesure la différence de potentiel engendrée (Figure 2.14). Cette procédure est répétée au moins trois fois afin de s'assurer que la valeur mesurée est la même à chaque fois (on parle de procédure de stacking). Le Syscal calcule l'écart type *q* des mesures et l'affiche à l'écran pour chaque série de stack, ce qui permet de renseigner sur la qualité des acquisitions.

Le nombre de stacks (minimum et maximum) et la valeur minimale du paramètre *q* sont définis lors de la création de la séquence, ou sur le terrain à l'aide du clavier du Syscal. La mesure est répétée autant de fois que le nombre minimal de stack, jusqu'à ce que la valeur de *q* atteigne la valeur fixée (généralement, on pose *q* = 0 %). Si cette valeur n'est pas atteinte, l'appareil réalise des stacks supplémentaires, jusqu'au nombre maximal défini.

Ainsi, une fois la mesure lancée, il est nécessaire de contrôler les valeurs du paramètre *q*, afin qu'il reste proche de la valeur fixée lors de la définition de la séquence. Celui-ci est affiché sur l'écran (Figure 2.15) après chaque mesure.

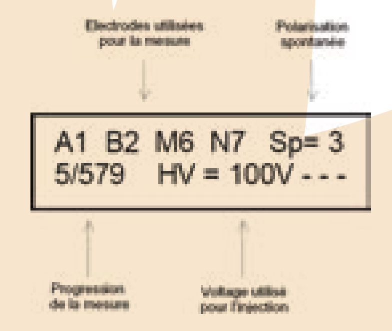


Figure 2.14 – Affichage à l'écran du Syscal pendant la réalisation d'une mesure.

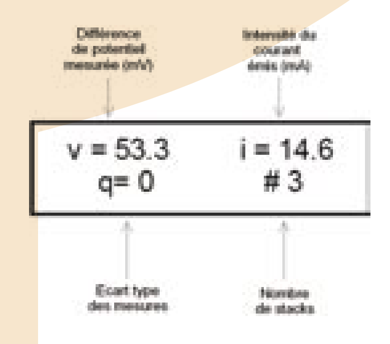


Figure 2.15 – Affichage à l'écran du Syscal après la réalisation d'une mesure.

Topographie du profil

Lorsque le terrain présente de la topographie, celle-ci peut induire des effets perturbateurs sur les mesures. Ces effets peuvent être pris en compte lors de l'interprétation dans le logiciel RES2DINV (Geotomo Softwares) par exemple, à condition que la topographie du profil soit indiquée lors de l'interprétation.
Pour cela, il est nécessaire de relever la topographie du profil par rapport à la position des électrodes. Cette mesure peut être réalisée au cours de la mesure, à condition de prendre soin à ne pas débrancher d'électrode malencontreusement en circulant autour du câble multiélectrode (une mesure comprenant 72 électrodes dure généralement entre 30 et plus de 60 minutes en fonction des paramètres de la séquence).

FIN DE LA MESURE ET RANGEMENT DU MATÉRIEL

Une fois la mesure terminée, et avant de ranger le matériel, il est absolument nécessaire de contrôler la qualité des données. Cela se fait à l'aide d'un ordinateur, et permet de détecter d'éventuels problèmes ayant eu lieu au cours de la mesure (électrode malencontreusement débranchée, problème de transmission). Pour cela, les mesures doivent être transférées de la mémoire du Syscal vers l'ordinateur et vérifiées à l'aide du logiciel PROSYS (Iris Instruments) par exemple (Annexe B).

Le rangement du matériel peut être réalisé de la façon suivante :

1. Débranchement des électrodes des câbles multiélectrodes.
2. Récupération des électrodes et des pinces crocodiles (attention, si les pinces crocodiles (de couleur orange) sont enlevées avant de s'occuper des électrodes, on risque de ne plus voir les électrodes sur le profil. L'idéal est de tout enlever ensemble, une personne s'occupe de la pince et l'autre de l'électrode).
3. Débranchement des boîtes de jonction et du Syscal des câbles multiélectrodes ;
4. Roulement des câbles multiélectrodes.

Lors du débranchement des câbles multiélectrodes et des boîtes de jonction, il faut également faire attention à bien mettre les bouchons de protection des prises, et de vérifier que le bouchon est sec (afin d'éviter l'humidité au niveau des connexions des câbles). Ne pas hésiter à utiliser la bombe d'air sec pour les nettoyer au cas où.
Le roulement des câbles multiélectrodes doit être réalisé avec soin, et ce afin de préserver le bon fonctionnement de l'équipement. Une solution consiste à positionner la bobine au niveau d'une extrémité avec une personne qui s'occupera de rouler le câble, pendant qu'une autre personne récupère l'autre extrémité et la ramène au niveau de la bobine en laissant le câble traîner sur le sol (attention toutefois de ne pas tirer le câble par la prise). Une fois les deux extrémités du câble multiélectrode côte à côte, celui-ci peut être roulé. Ceci permet de rouler le câble sans que la prise située à l'autre extrémité ne traîne sur le sol.

QUELQUES CONSEILS POUR L'INTERPRÉTATION

L'objectif de cette section n'est pas de présenter l'interprétation pas-à-pas, mais de donner quelques conseils relatifs à l'interprétation des résultats, et à leur présentation. On peut retenir de cette section qu'il n'est pas utile de faire trop d'itérations, ni de compliquer le modèle d'interprétation.

A PROPOS DES DONNÉES

Avant de se lancer dans l'interprétation, il convient de bien vérifier la qualité des données, et la dispersion des mesures les unes par rapport aux autres. La procédure est décrite Annexe B pour les logiciels Prosys (Iris Instruments) et Res2dInv (Geotomo Software). La résistivité apparente étant une grandeur intégratrice, celle-ci est supposée présenter des variations faibles d'une mesure à l'autre. Ainsi, les fortes variations d'un point à l'autre sont généralement dues à des problèmes de mesure et doivent être retirées.

A PROPOS DU NOMBRE D'ITÉRATIONS

Comme il est présenté dans le chapitre 1, l'interprétation est un processus itératif, pendant lequel un logiciel tente de minimiser l'écart entre les mesures et un modèle. Bien que l'on ait tendance à augmenter le nombre d'itérations pour diminuer cet écart, on peut considérer que l'interprétation est terminée à partir du moment où l'erreur RMS ou ABS (qui quantifie l'écart entre le modèle et les mesures) ne diminue plus de façon significative (variation de l'ordre de 0,5 à 1% avec l'itération précédente). On peut retenir ainsi qu'il ne sert pas à grand chose d'augmenter indéfiniment le nombre d'itérations.

A PROPOS DU MODÈLE

De manière générale, lorsqu'on ne dispose pas d'information a priori, il convient de privilégier le modèle le plus simple possible pour interpréter des mesures. Si l'on dispose d'informations provenant d'un log de forage par exemple ou des résultats obtenus à l'aide d'une autre technique, celles-ci doivent obligatoirement être prises en compte dans l'interprétation.

A PROPOS DE LA TOPOGRAPHIE

A moins que le terrain soit bien horizontal, ne pas oublier d'intégrer la topographie lors de l'interprétation. Sans cela, l'interprétation peut être vraiment faussée.

A PROPOS DE L'ERREUR RMS

Il n'existe pas de « règle » ou de valeur limite de l'erreur RMS, la seule chose à savoir est que celle-ci doit être la plus faible possible, sans pour autant réaliser trop d'itérations. Cinq itérations sont généralement suffisantes pour obtenir une solution en accord avec les données, à moins que les données ne soient bruitées ou posent un problème.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les profils de résistivité interprétée doivent présenter :

- la direction du profil ;
- le nombre d'itérations ;
- l'erreur RMS ou ABS (en %).



Chapitre 3
EXEMPLES D'APPLICATION



EXEMPLE D'UTILISATION EN ZONE DE SOCLE

Une prospection géophysique a été conduite sur la côte Ouest indienne, dans le district du Dakshina Kannada, dans l'état du Karnataka (Hoareau, 2009). L'objectif de cette prospection était d'identifier des sites favorables pour l'implantation de forages pour l'alimentation en eau potable. Un milieu fracturé productif a été identifié, et a fait l'objet d'un pompage d'essai. L'interprétation de cet essai a pu notamment être précisée par l'utilisation du panneau électrique.

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

La zone étudiée (13°01'N, 74°79'E) est située à l'intérieur du campus d'un institut de recherche : le *National Institute of Technology of Karnataka* (NITK), à 30 km de la ville de Mangalore. Elle est bordée par la mer d'Arabie à l'Ouest et par un cours d'eau intermittent à l'Est (Figure 3.1).
A l'image de l'Inde péninsulaire, le socle de cette région est constitué de roches cristallines anciennes (gneiss archéens), recoupées notamment par de nombreux dykes de dolérite (Manjunatha et Harry, 1994). Excepté le cas de certaines collines ou bas-fonds où elles affleurent, ces roches sont recouvertes dans l'ensemble de la région par des formations latéritiques (Widdowson et Gunnell, 1999).
L'approvisionnement en eau dans cette région est réalisé par le biais de puits peu profonds (5 à 10 m) qui captent un aquifère situé dans la couverture latéritique, ou de forages profonds (50 à 200 m) qui permettent de capter les fractures du socle sain. Ces forages profonds présentent des productivités très variables, qui soulignent l'hétérogénéité de ce milieu.

UTILISATION DE LA TECHNIQUE DU PANNEAU ÉLECTRIQUE

Mesures réalisées

Un total de 25 panneaux électriques a été réalisé sur le site du NITK afin d'estimer les structures souterraines, et identifier ainsi les sites d'implantation de forage intéressants. Les panneaux ont été réalisés principalement suivant deux directions : d'Est en Ouest (perpendiculaire à la mer afin d'étudier les structures liées à l'intrusion saline) et du Nord au Sud (parallèle à la mer, afin d'imager d'éventuelles hétérogénéités dans cette direction). Les localisations de ces panneaux sont présentées Figure 3.1. La qualité des mesures s'est révélée bonne sur l'ensemble des profils.

Interprétation

L'interprétation des panneaux électriques a été réalisée à l'aide du logiciel RES2DINV (Geotomo Software). Chaque panneau a fait l'objet de deux mesures : une mesure en Wenner-Schlumberger et une en Wenner Beta. Les deux profils ont alors été combinés (à l'aide du logiciel X2IPI) et interprétés comme un seul profil.

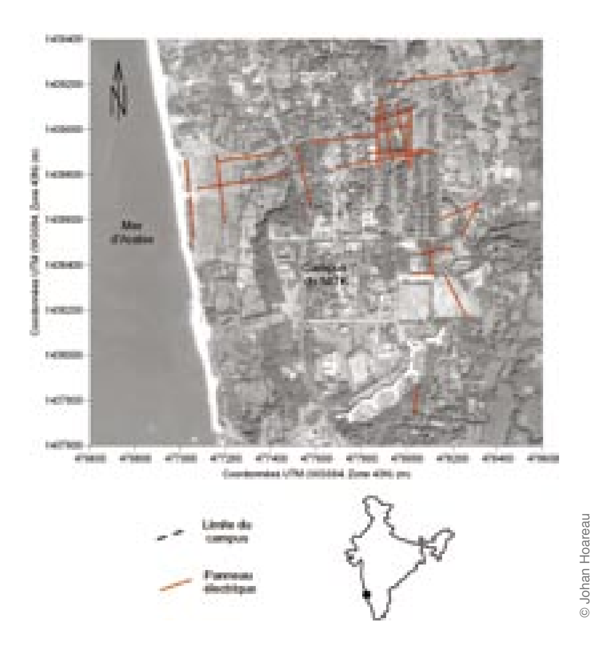


Figure 3.1 – Localisation des profils de tomographie de résistivité électrique sur le site du NITK.

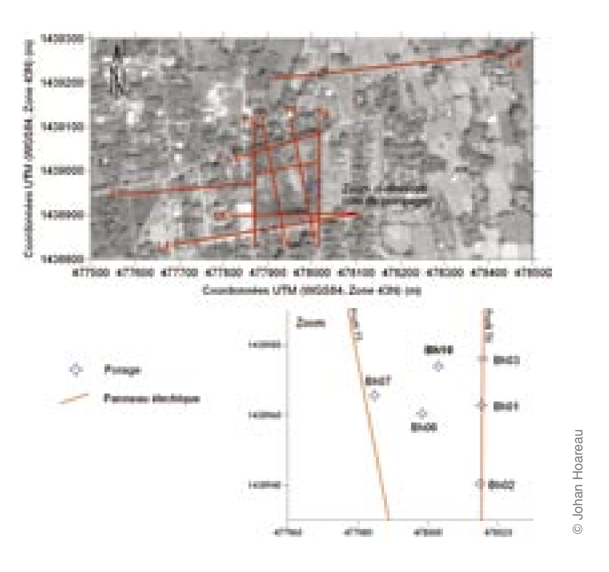


Figure 3.2 – Localisation des profils de tomographie de résistivité électrique et des forages sur le site du NITK (les tubages de forage sont en PVC).

Des forages ont été mis en place au niveau des structures géoélectriques principales identifiées à l'aide des panneaux électriques. La combinaison des résultats d'interprétation des panneaux électriques et des informations tirées des logs de forages a permis d'établir une correspondance entre certaines gammes de résistivité électrique et les formations géologiques présentes sur ce site. Ces correspondances, présentées dans le tableau 3.1, permettent d'interpréter les profils de résistivité électrique en termes de modèle géologique.

Gamme de résistivité (Ωm)	Type de roche
moins de 80	Formations argileuses
entre 80 et 400	Formations altérées
entre 400 et 800	Formations fracturées
de 800 à 8000	Roche peu fissurée / saine

Tableau 3.1 – Correspondances entre résistivité et géologie sur le site du NITK.

Le modèle défini à proximité du forage Bh10 est présenté Figure 3.3 comme un exemple. Ce forage présente une productivité importante, synonyme dans ce genre de contexte de l'existence d'un milieu fracturé.
Le modèle met en évidence une structure conductrice (60 Ωm) altérée qui recoupe le milieu plus résistant (entre 400 et 800 Ωm) capté par les forages Bh10, Bh01 et Bh03. Lorsque l'on pompe dans le puits Bh10, les puits Bh01 et Bh03 réagissent, mais le puits Bh02 ne montre aucune réaction. Cette formation joue donc le rôle d'une limite à flux nul, ce dont il faut tenir compte si l'on cherche à exploiter le puits Bh10 pour l'alimentation en eau potable. La présence de cette limite ne peut pas être définie qu'à l'aide des mesures géophysiques (dans le cas où l'on ne dispose pas du forage Bh02).
Les résultats géophysiques permettent donc de positionner une limite à flux nul orientée Est-Ouest, à une distance d=26 m (entre 22 et 36 m) au Sud du puit de pompage. Connaissant la position de cette limite, il devient possible de positionner des forages dans ce milieu fracturé, et d'interpréter des pompages d'essai.

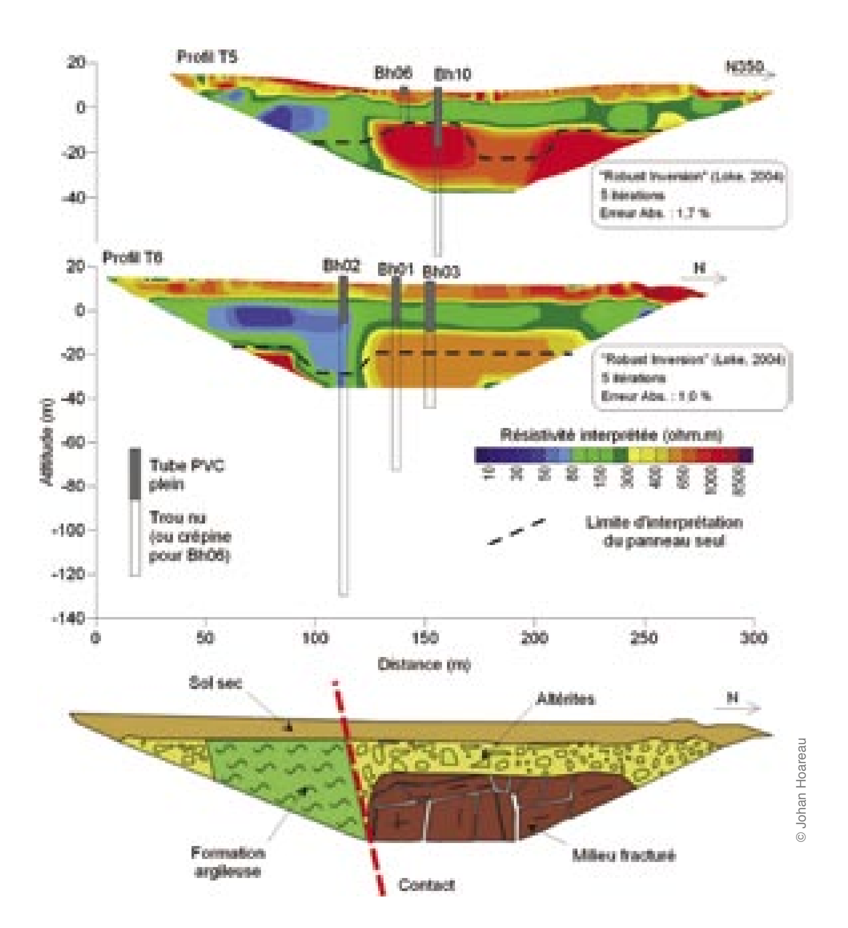


Figure 3.3 – Profils de résistivité électrique T5 et T6 réalisés sur le site du NITK au niveau des puits de pompage et d'observation et modèle géologique associé (pour le profil T6). La limite d'interprétation des panneaux est estimée à partir de l'analyse de sensibilité de l'interprétation géophysique réalisée par le logiciel Res2dInv (Geotomo Software).

RÉSUMÉ DE LA DÉMARCHE

La démarche suivie lors de cette étude peut être résumée de la façon suivante :

1. Etude du site (bibliographie existante, affleurements, structures principales).
2. Identification des sites d'implantation des panneaux, préparation des profils.
3. Mesures et interprétations des panneaux électriques.
4. Forage au niveau des structures principales mises en évidence par les panneaux électriques.
5. Etablissement des correspondances entre géophysique et géologie.
6. Mise en place des forages, pompages d'essai.

Chaque journée de mesure (de 8h à 18h environ) peut être résumée de la façon suivante :

1. Préparation du profil (taille des arbres, dégagement du chemin).
2. Mise en place des électrodes avec les décamètres, connexion des câbles multiélectrodes et de l'équipement.
3. Contrôle de l'installation, mesure des résistances de prises, ajustement si besoin ;
4. Lancement de la mesure.
5. Pendant le déroulement de la mesure (environ une heure), réalisation de la topographie par une équipe, pendant que l'autre équipe préparait le layon du second profil.
6. Fin de la mesure : contrôle de la qualité des données et répétition des mesures (si besoin) ou rangement du matériel.
7. Si le temps le permet, réalisation du second profil.

Toutefois, on conseille plutôt la réalisation d'un profil par jour, afin de maximiser la qualité des données et d'éviter d'enlever les électrodes une fois la nuit tombée.

EXEMPLE D'UTILISATION EN MILIEU CÔTIER

Une prospection géophysique a été conduite sur un cordon sableux côtier situé dans le district du Dakshina Kannada (Hoareau, 2009). L'objectif de cette prospection était d'étudier les ressources en eau présentes sur ce cordon sableux. Pour cela, différentes techniques géophysiques ont été utilisées, dont notamment la technique de panneau électrique.

Avant toute chose, il faut préciser que la technique de panneau électrique seule n'est pas vraiment adaptée à l'étude de ce genre de milieu. En effet, la forte résistance électrique du sable sec (plusieurs milliers d'Ωm généralement) rend l'injection de courant dans le sol compliquée. De plus, la présence de terrains conducteurs (le sable saturé d'eau salée) limite la profondeur d'investigation.

Nous l'avons utilisée sur ce site essentiellement pour évaluer l'hétérogénéité des structures du sous-sol sur l'ensemble du site.

SITE D'ÉTUDE

La frange côtière du district du Dakshina Kannada se caractérise par la présence de longues plages étroites et de cordons sableux reposant sur le socle gneissique. L'estuaire de la rivière Pavanje est formé notamment par un de ces cordons (le cordon de Sasihithlu), qui s'étire parallèlement à la côte sur cinq kilomètres, avec une largeur moyenne de 250 m (Figure 3.4).

L'approvisionnement en eau sur ce cordon est assuré par une nappe peu profonde (1 à 2 m par rapport au sol), captée par des puits peu profonds exploités de façon manuelle. La conductivité électrique de l'eau souterraine varie au cours de l'année avec les précipitations, ainsi qu'en fonction de la localisation sur le cordon.

PANNEAU ÉLECTRIQUE RÉALISÉ SUR UN COUVERT ARGILEUX

Objectif de la mesure

Le premier panneau électrique présenté a été réalisé dans la longueur du cordon, le long du chemin qui permet de se rendre du village de Sasihithlu (au Sud) à la pointe Nord du cordon (Panneau L1, Figure 3.5). Il s'agit d'un panneau de 72 électrodes, avec un espacement inter-électrode de 8 m, et l'utilisation conjointe des dispositifs Wenner Schlumberger et Wenner beta. L'idée était d'évaluer l'hétérogénéité du sous-sol entre les parties Nord et Sud, et donc d'avoir une profondeur d'investigation importante (d'où l'utilisation d'un espacement inter-électrode important).

Particularité de la mesure

Le profil a pu être mis en place au niveau du chemin, qui était constitué d'une couverture argileuse sèche. Les électrodes ont été arrosées à l'eau de mer avant le lancement de la mesure afin de

réduire les résistances de prise (plus de 15 kΩ en moyenne). La journée étant fortement ensoleillée, les électrodes ont de plus été protégées avec de l'herbe sèche (Figure 3.6) pour éviter que l'eau ne s'évapore trop rapidement.

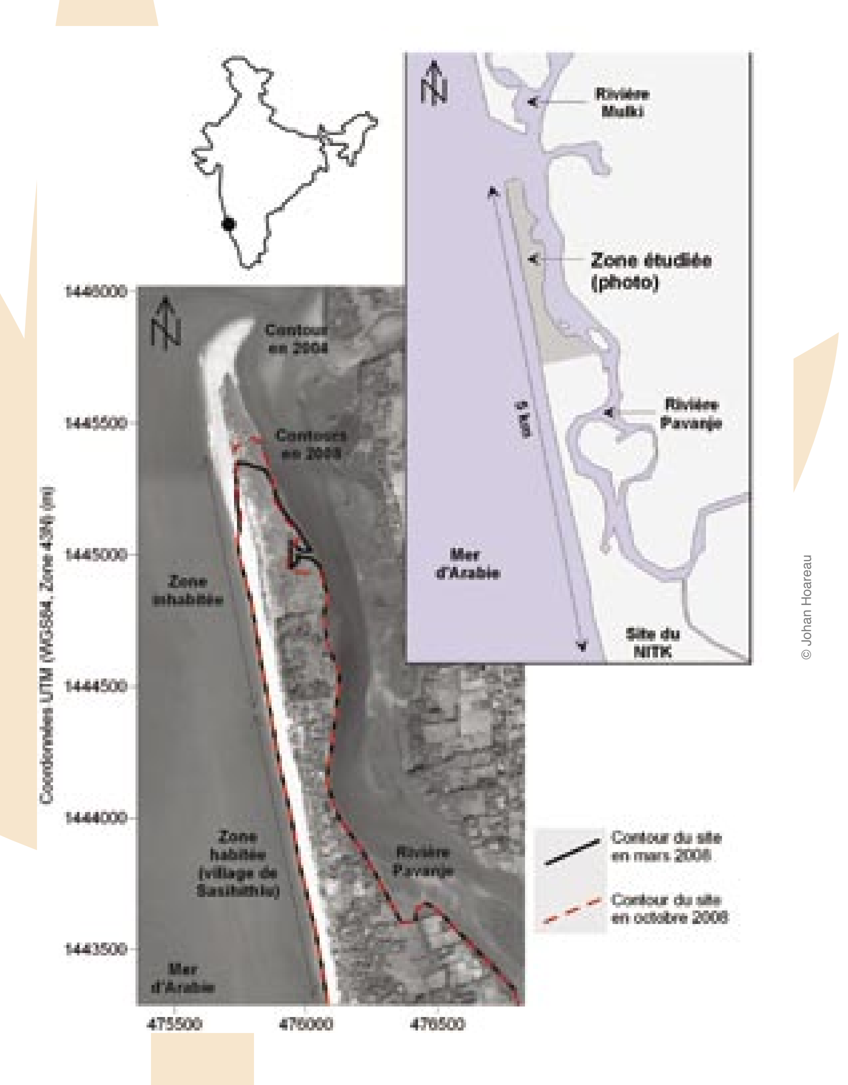


Figure 3.4 – Localisation du cordon sableux de Sasihitlu (Photo : Google Earth, 2004).

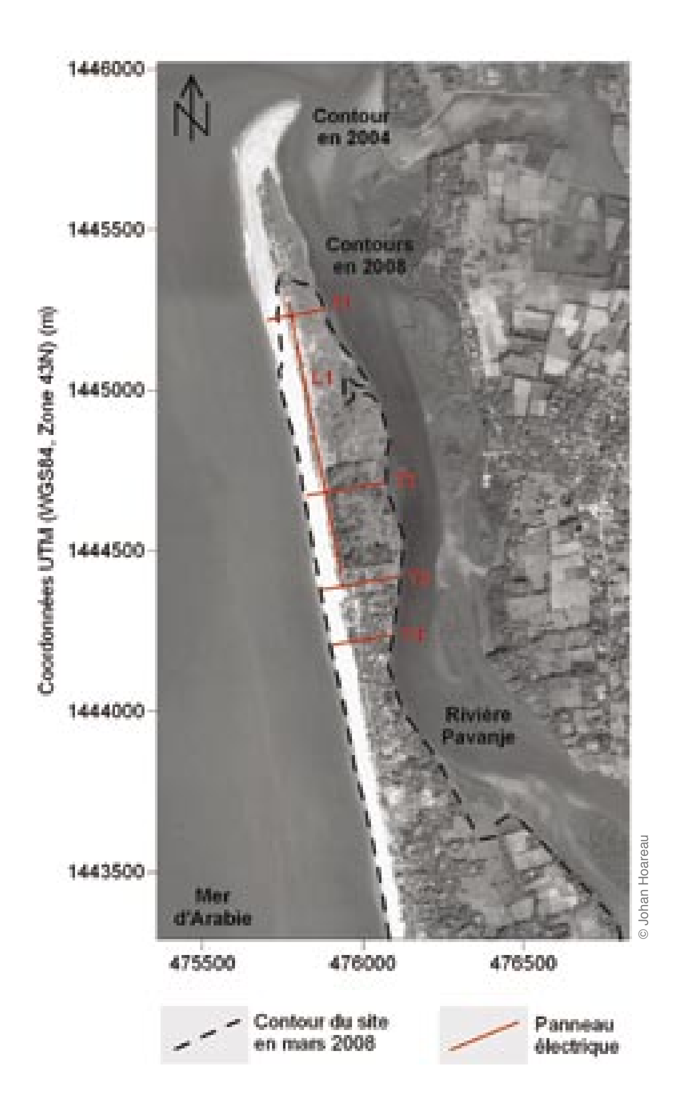


Figure 3.5 – Localisation des mesures électriques sur le cordon sableux de Sasihitlu.



Figure 3.6 – Electrode arrosée et protégée avec de l'herbe sèche pour éviter l'évaporation trop rapide.

Au cours de cette mesure, une douzaine d'électrodes ont été débranchées par des gens voulant passer en voiture sur ce terrain. Or, l'appareil n'indique pas qu'une électrode est débranchée, il réalise une mesure qui ne sera pas prise en compte lors du traitement des données (l'écart type de ce genre de mesure atteint généralement q=100%). Il est donc important de contrôler son profil au cours de la mesure.

Résultats

Les données obtenues ont été de qualité correcte. Toutefois, l'interprétation présente une qualité moyenne, avec une erreur de l'ordre de 13% (Figure 3.7). Ceci indique qu'il faut faire très attention aux conclusions que l'on tire de l'interprétation de ce panneau. Le mieux à faire dans ce cas là est de contraindre ce résultat avec des résultats obtenus à l'aide d'autres techniques (comme le TDEM par exemple).

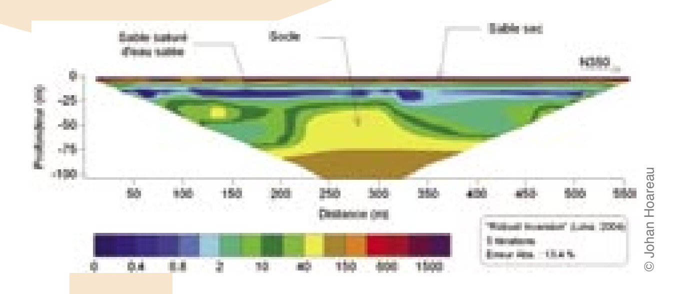


Figure 3.7 – Interprétation proposée pour le panneau électrique réalisé dans la longueur du cordon.

Le fait que l'interprétation soit moins bonne qu'en domaine de socle (chapitre précédent) peut être dû au fait que le panneau est réalisé en suivant la direction du cordon, parallèle à la direction de deux hétérogénéités fortes : le bord de mer et le bord de la rivière. Ainsi, le fait que l'on soit parallèle aux hétérogénéités perturbe la mesure en 2D (cf. Figure 2.4, page 35).

PANNEAU ÉLECTRIQUE RÉALISÉ SUR LE SABLE SEC

Objectif de la mesure

Sur ce même site, des panneaux électriques ont été réalisés dans la largeur du cordon, entre la mer et le lagon (Figure 3.5). L'objectif de ces panneaux était d'estimer les structures souterraines dans la direction de l'intrusion saline. Pour cela, trois panneaux ont été réalisés entre le Nord et le Sud du site.

Particularité de la mesure

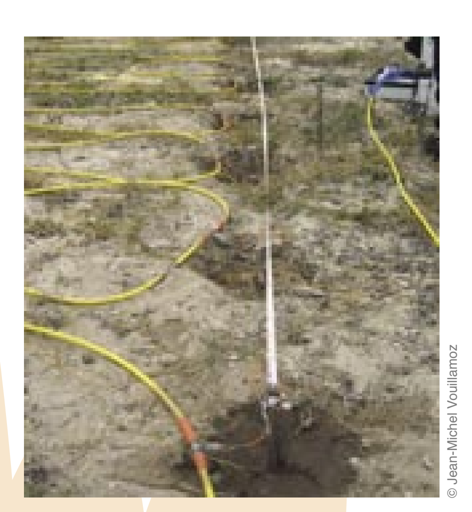
Par rapport au panneau L1, ces trois panneaux ont été réalisés dans directement sur le sable sec, sans couvert argileux pour l'installation des électrodes (Figure 3.8). Le sable sec étant très résistant, il nous a fallu batailler pour obtenir des résistances de prise suffisamment faibles pour réaliser la mesure.



© Johan Hoareau

Figure 3.8 – Réalisation d'un panneau électrique de 36 électrodes sur du sable sec avec un très faible espacement interélectrode (50 cm). A noter : les câbles multiélectrodes (jaunes) sont bien rangés sur le côté pour éviter de marcher dessus, le décamètre en place pour la position des électrodes (blanc), et une seule prise du Syscal est utilisée (36 électrodes numérotées de 1 à 36 sur la prise gauche, cf Figure 2.12).

Dans un premier temps, chaque électrode a été doublée (nous avons utilisé deux électrodes au lieu d'une, Figure 3.9) et entourée d'aluminium. Ensuite, chaque « double électrode » a été enfoncée au maximum dans le sol afin de maximiser la surface de contact avec le milieu (Figure 3.10). De l'eau de mer a également été versée au niveau de chaque électrode, couverte à l'aide d'herbe sèche ou de feuilles.



© Jean-Michel Vouillamoz

Figure 3.9 – Panneau réalisé dans le sable avec électrodes doublées et un espacement de 50 cm.

Malgré ces précautions, certaines électrodes présentaient toujours des résistances de prise trop importantes. Ainsi, nous avons rempli des bouteilles d'eau de mer, et les avons plantées dans le sable en les laissant doucement percoler dans le terrain, afin d'assurer une bonne connexion (Figure 3.10).



© Johan Hoareau

Figure 3.10 – Electrode doublée, entourée d'aluminium avec une bouteille remplie d'eau de mer qui percole dans le terrain.

Résultats

L’ennui de cette mesure, c’est qu’il nous a fallu beaucoup arroser les électrodes. Ainsi, les résultats montrent l’effet de cet arrosage : on observe de panaches conducteurs dans le sable sec résistant, qui correspondent à l’eau salée qui percole dans le terrain (Figure 3.11). Ces mesures n’ont malheureusement pas pu être interprétées correctement.

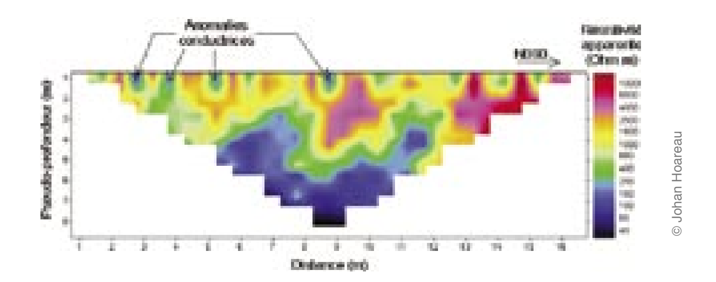
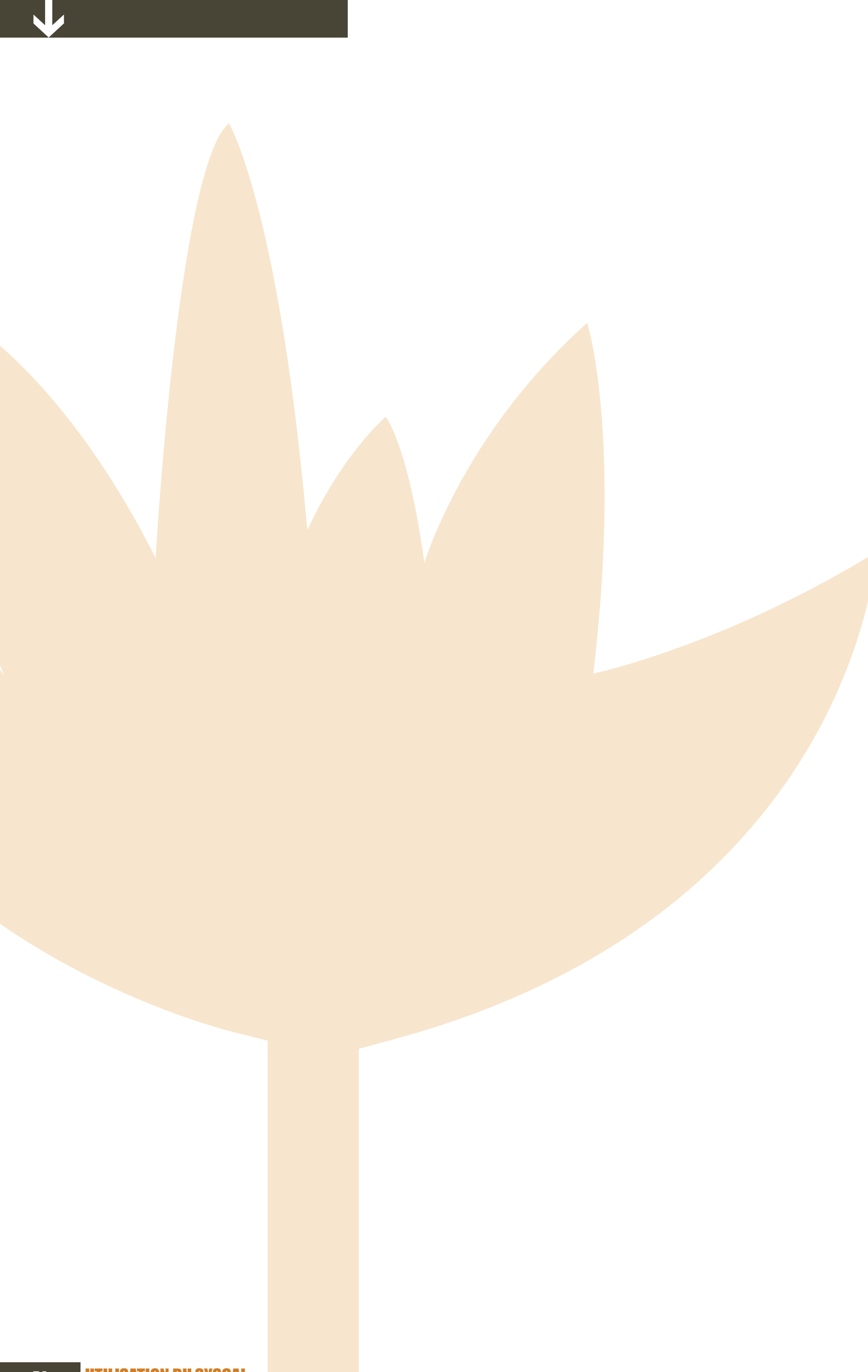
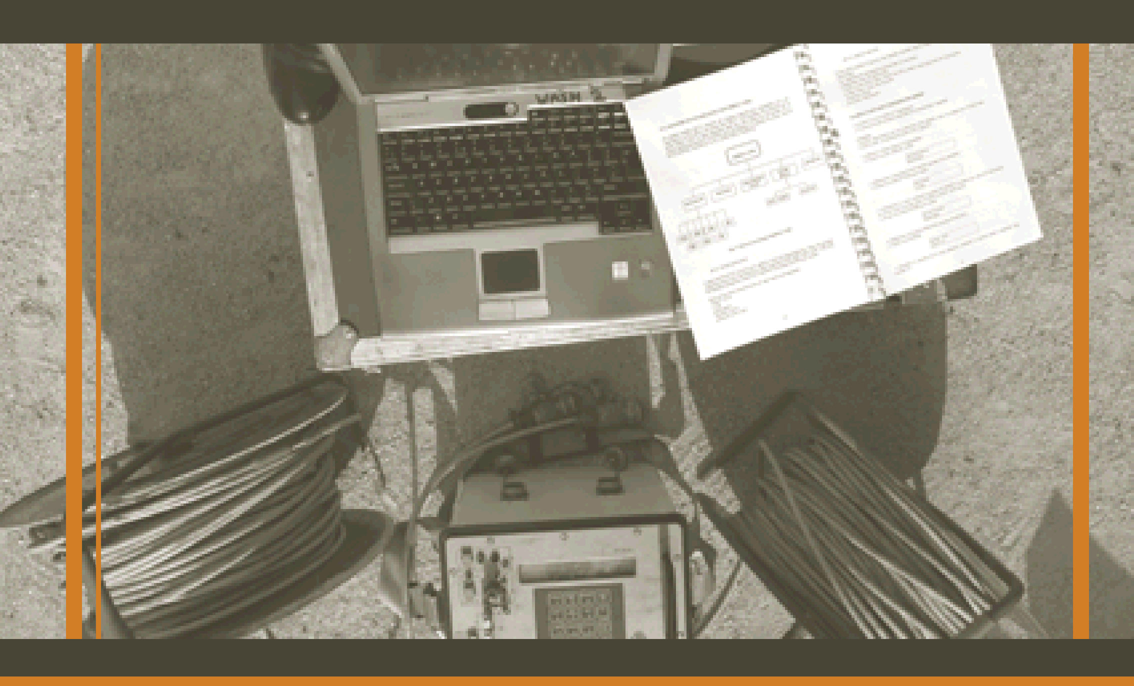


Figure 3.11 – Section de résistivité apparente (non interprétée) obtenue sur le cordon sableux de Sasihithlu. Les essais d’interprétation ont donné des écarts RMS trop importants.



Chapitre 4
ANNEXES



Annexe A

Le Syscal R1 Plus Switch 72

Les documents suivant proviennent de la documentation technique éditée par Iris Instruments.
Ils décrivent les spécificités du Syscal R1 Plus Switch 72.

SYSCAL R1 PLUS *Switch-72*



RESISTIVITY IMAGING FOR ENVIRONMENTAL APPLICATIONS

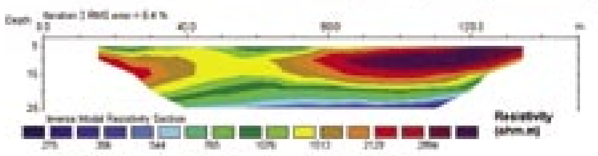
- **Compact yet powerful**
- **600 V – 200 W – 2.5 A**
- **Automatic ranging**
- **Automatic switching**



SYSCAL R1 PLUS Switch-72 is a new **all-in-one multinode resistivity imaging** system. It features an internal switching board for 72 electrodes and an internal 200 W power source. The output current is automatically adjusted (automatic ranging) to optimise the input voltage values and ensure the best measurement quality. The system is designed to automatically perform pre-defined sets of resistivity measurements with roll-along capability. Four strings of cable with 18 electrode take-out each are connected together on the back of the resistivity meter. Made of heavy duty seismic cable, these strings are available with standard 5 or 10 m electrode spacings. Customized cables may also assembled for special arrays or non-standard applications.

Compact, easy-to-use and field proof, the SYSCAL R1 PLUS Switch-72 measures both resistivity and chargeability (IP). It is ideal for environmental and civil engineering applications such as pollution monitoring and mapping, salinity control, depth-to-rock determination and weathered bedrock mapping. It can also be used for shallow groundwater exploration (depth and thickness of aquifers).

With the SYSCAL R1 PLUS Switch-72 resistivity surveys can be performed very efficiently with one operator only.



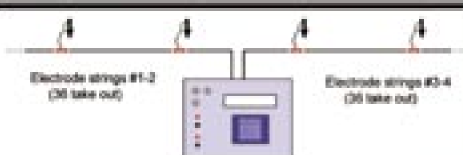
Resistivity interpretation (2D section of true resistivity)

The well-known reliability and accuracy of the SYSCAL range of resistivity meters will also mean extra value both for the contractor and the results end-user.

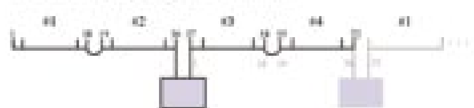
RESISTIVITY IMAGING

- Aim: imaging the underground geological structures through surface electrical measurements
- Principle: transmitting a current I through two electrodes and measuring a voltage V with two other electrodes
- Apparent resistivity: $\rho = K*V/I$, K depending on the electrode separation
- Resistivity pseudo-section: contoured plot of the apparent resistivity data, using the electrode distance as a pseudo-depth parameter
- True resistivity section: contoured plot of the resistivity distribution obtained through the inversion of the measured data (using a non linear parameter fitting scheme)
- Applications: environmental studies, groundwater investigation, civil engineering, archaeology...

FIELD LAY-OUT



Preset arrays (Wenner, dipole,...) or customized arrays are uploaded through the user-friendly ELECTRE (version 2) PC software.
The roll-along capability is implemented.



ACCURACY

- Automatic SP compensation including linear drift
- Digital stacking for noise reduction
- Standard deviation computation
- Noise may be monitored before injection

DATA INTERPRETATION SOFTWARE

- RES2DINV or RESIX-2DI (PC),
  for pseudo-section inversion to true resistivity (and IP) 2D section

- RES3DINV (PC),
  for inversion to true resistivity (and IP) 3D data

OUTPUT CURRENT SPECIFICATIONS

- Automatic ranging
  (microprocessor controlled)
- Intensity: up to 2500 mA
- Voltage: up to 600V
  (1200V peak to peak)
- Power: up to 200 W
- Selectable cycle time of 0.25, 0.5 , 1 or 2 s
  programmable from 0.25 to 10 s.
- Current measurement precision:
  0,5% typical.

INPUT VOLTAGE SPECIFICATIONS

- Measuring process:
  automatic ranging and calibration
- Input impedance : 10 MΩ minimum.
- Input voltage protection up to 1000V,
  range from –5 V to +5 V.
- Power line rejection
- Voltage measurement precision:
  0.5% typical
- Noise reduction: continuous stacking
  selectable from 1 to 255 stacks.
- SP compensation
  through automatic linear drift correction.
- Resistivity accuracy: 0,5% typical
- Induced polarization (chargeability)
  measured over four predefined windows.
- Chargeability accuracy:
  1% of measured value for input voltage higher than 10 mV.

GENERAL SPECIFICATIONS

- Weather proof
- Shock resistant fiber-glass case
- Operating temperature: -20 to +70 °C
- Dimensions: 31 x 23 x 40 cm.
  Weight: 11.5 kg
- Internal memory for 2700 readings
- Power supply: two internal rechargeable 12V, 7 Ah battery ; optional external 12V backup car battery for transmitter power
- Autonomy with internal battery:
  several thousands of readings
- Weight of a 18 take-out string on a reel:
  15 kg each (for 5m spacing)

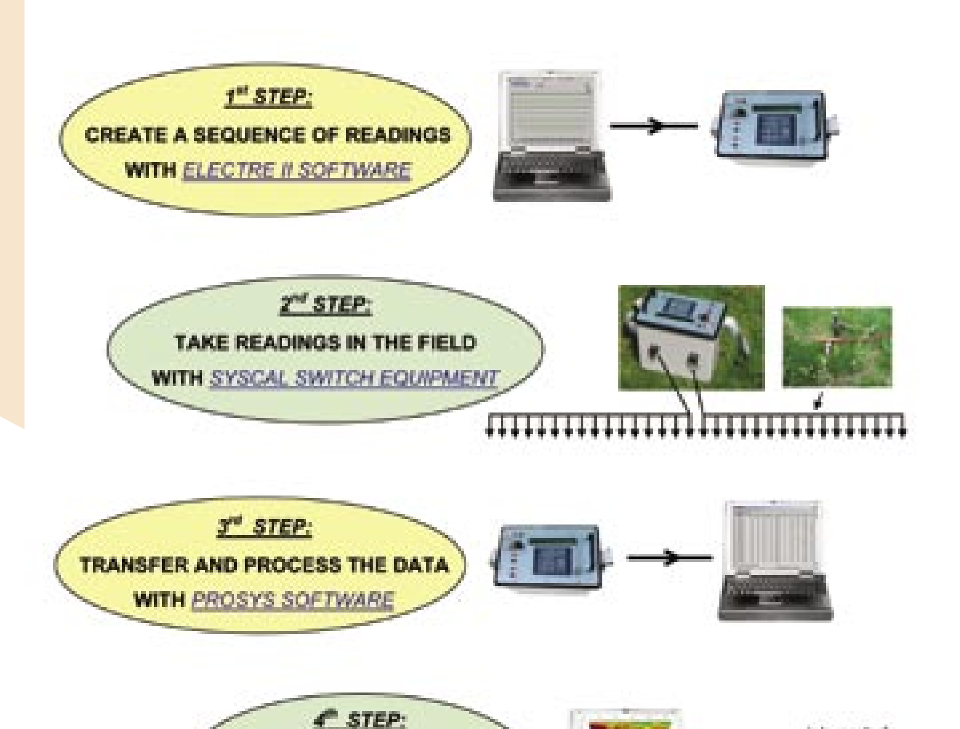


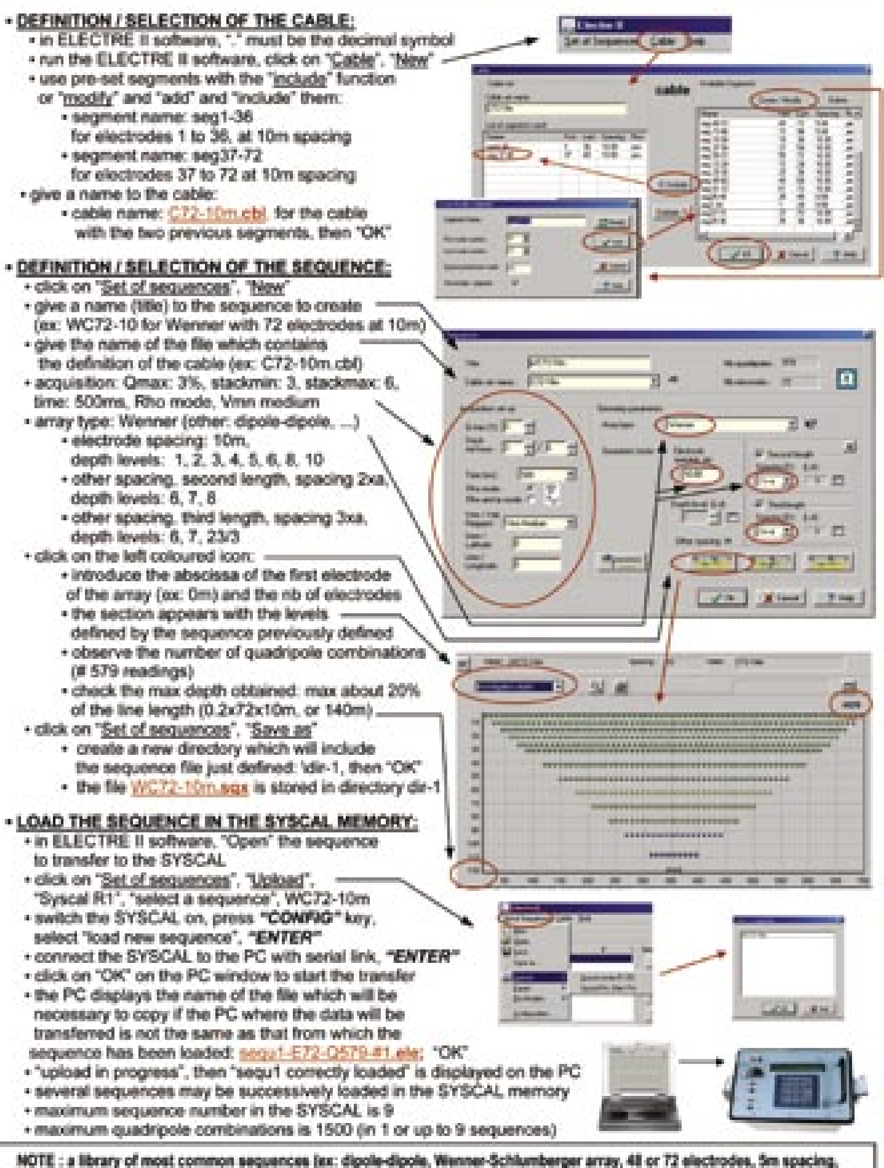



Annexe B

Réalisation pas à pas d'un panneau

Les documents suivant proviennent de la documentation technique éditée par Iris Instruments. Ils reprennent, en anglais, les différentes étapes de réglage du Syscal, de réalisation de la mesure et d'interprétation d'un panneau électrique.





1st STEP: CREATE A SEQUENCE OF READINGS WITH *ELECTRE II SOFTWARE*

- **DEFINITION / SELECTION OF THE CABLE:**
  - in ELECTRE II software, "." must be the decimal symbol
  - run the ELECTRE II software, click on "Cable", "New"
  - use pre-set segments with the "include" function or "modify" and "add" and "include" them:
    - segment name: seg1-36 for electrodes 1 to 36, at 10m spacing
    - segment name: seg37-72 for electrodes 37 to 72 at 10m spacing
  - give a name to the cable:
    - cable name: C72-10m.cbl, for the cable with the two previous segments, then "OK"

- **DEFINITION / SELECTION OF THE SEQUENCE:**
  - click on "Set of sequences", "New"
  - give a name (title) to the sequence to create (ex: WC72-10 for Wenner with 72 electrodes at 10m)
  - give the name of the file which contains the definition of the cable (ex: C72-10m.cbl)
  - acquisition: Qmax: 3%, stackmin: 3, stackmax: 6, time: 500ms, Rho mode, Vmn medium
  - array type: Wenner (other: dipole-dipole, ...)
    - electrode spacing: 10m, depth levels: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10
    - other spacing, second length, spacing 2xa, depth levels: 6, 7, 8
    - other spacing, third length, spacing 3xa, depth levels: 6, 7, 23/3
  - click on the left coloured icon:
    - introduce the abscissa of the first electrode of the array (ex: 0m) and the nb of electrodes
    - the section appears with the levels defined by the sequence previously defined
    - observe the number of quadripole combinations (# 579 readings)
    - check the max depth obtained: max about 20% of the line length (0.2x72x10m, or 140m)
  - click on "Set of sequences", "Save as"
    - create a new directory which will include the sequence file just defined: \dir-1, then "OK"
    - the file WC72-10m.sqs is stored in directory dir-1

- **LOAD THE SEQUENCE IN THE SYSCAL MEMORY:**
  - in ELECTRE II software, "Open" the sequence to transfer to the SYSCAL
  - click on "Set of sequences", "Upload", "Syscal R1", "select a sequence", WC72-10m
  - switch the SYSCAL on, press ***"CONFIG"*** key, select "load new sequence", ***"ENTER"***
  - connect the SYSCAL to the PC with serial link, ***"ENTER"***
  - click on "OK" on the PC window to start the transfer
  - the PC displays the name of the file which will be necessary to copy if the PC where the data will be transfered is not the same as that from which the sequence has been loaded: sequ1-E72-Q579-#1.ele: "OK"
  - "upload in progress", then "sequ1 correctly loaded" is displayed on the PC
  - several sequences may be successively loaded in the SYSCAL memory
  - maximum sequence number in the SYSCAL is 9
  - maximum quadripole combinations is 1500 (in 1 or up to 9 sequences)

NOTE : a library of most common sequences (ex: dipole-dipole, Wenner-Schlumberger array, 48 or 72 electrodes, 5m spacing, with various investigation depths) is available in the "ELECTRE II / Library" directory of the CD supplied with the SYSCAL Switch

2nd STEP: TAKE READINGS IN THE FIELD WITH *SYSCAL SWITCH EQUIPMENT*

- **SET UP THE SYSCAL SWITCH AND ITS ACCESSORIES:**
  - *internal receiver* battery of the SYSCAL: checked with the ***"BATT"*** key (ex: 12.24V, 72%). Min is 10V, 0%
  - *internal transmitter* battery of the SYSCAL (1hour autonomy): checked by the green/red light
  - *external transmitter* battery (recommended): to be plugged when the previous light remains steadily red
  - (some units have an int / ext switch for the transmitter battery)
  - set up the multicore cables and connecting boxes, dig electrodes, connect alligator clips
  - check with the ***"MODE"*** key, that the "multi-electrode" option is selected
  - press the ***"SPACING"*** key to introduce the area and line parameters
  - check the connection of electrodes with the ***"RS CHECK"*** key: if "open line" is displayed during the automatic test of the 48 or 72 electrodes, dig more into the ground the electrode under control, or press ***"ENTER"*** to check the resistance of the following electrodes
  - by pressing ***"MONITOR"***, it is possible to introduce a set of A, B, M, N electrodes (ex: 1, 2, 10, 11), and select "Rs Check" to measure the resistance of AB electrodes, or "Monitor" to make a resistivity measurement with this quadripole. This can help to check a given stake, or decide the stack number

external transmitter battery plug

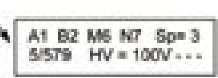
transmitter battery control light

multicore cable

- **LAUNCH THE AUTOMATIC SET OF READINGS CORRESPONDING TO THE SEQUENCE:**
  - select the sequence file with the ***"E.ARRAY"*** key: # 1 corresponds to the first sequence file loaded, # 2 corresponds to the second sequence file loaded, etc.
  - press ***"SET UP"*** to check or modify the quality (ex: 3%), stack-min (ex: 3) and max (ex: 6), time (ex: 500 ms), level of voltage required (ex: < 50mV)
  - press the ***"START"*** key: 1 reading with 4 stacks takes about 6s, 500 readings about 1/2 h
  - during the readings, a first display gives the numbers of the electrodes A, B, M and N where the measurement is currently made, the number of the present quadripole (n°5) over the total number of readings to take (579), also the output voltage (HV) used selected by the SYSCAL
  - a second display gives the values of the signal (v), of the current (i) of the standard deviation (q), and of the number of stacks in progress (#)
  - during the readings, a pause can be made with the ***"DOWN"*** key:
    - to reconnect an electrode which would be disconnected
    - to change the transmitter battery if the red light remains on
    - to modify the stack number, required voltage with the ***"SET UP"*** key
  - after a pause, press ***"START"*** to resume the sequence
  - press ***"FUNCT / STOP"*** to stop the acquisition of a sequence of readings before its normal end
  - when the sequence is finished, "Select function" is displayed

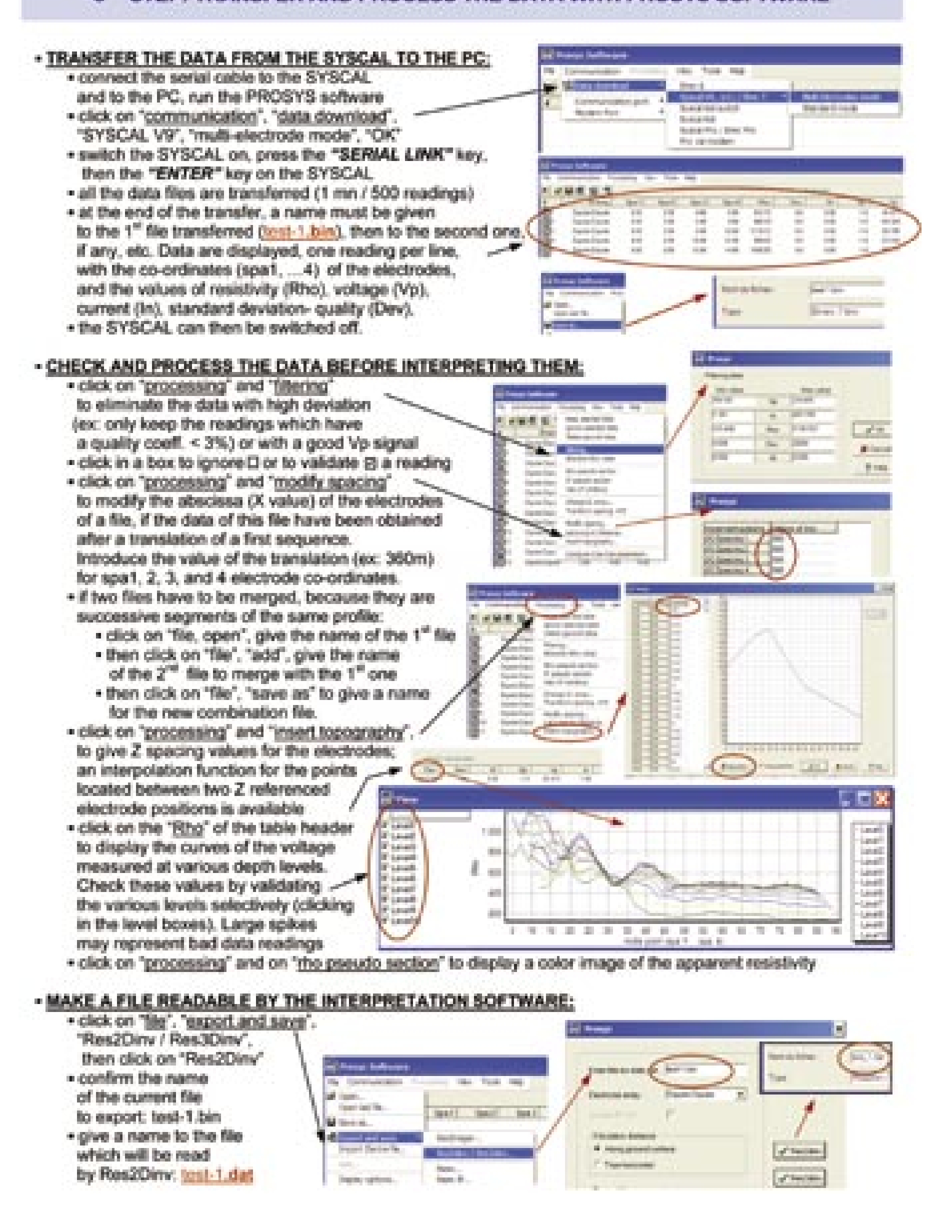
SYSCAL Switch keyboard





SYSCAL displays during acquisition

- **CHECK THE RESULTS STORED IN THE SYSCAL MEMORY:**
  - the data are automatically stored in "DATA FILE # 1" for the 1st set of readings, #2 for the 2nd one,...
  - to check the data after their acquisition, press the ***"RESULT"*** key, select the file number to read (#1, # 2,...) and check all the readings (voltage, current, resistivity) of this data file by pressing ***"ENTER"***.
  - capacity of the memory: 2 730 readings, in 1 to 83 data files max, with 1 500 readings max/data file
  - to delete data files, press ***"MEMORY"*** , ***"DOWN"***, then select "Del. all datafiles", and "0, 9, -, 7"
  - to delete sequence files, press ***"CONFIG"***, ***"DOWN"***, then select "Del. all sequences", and "0, 9, -, 7"



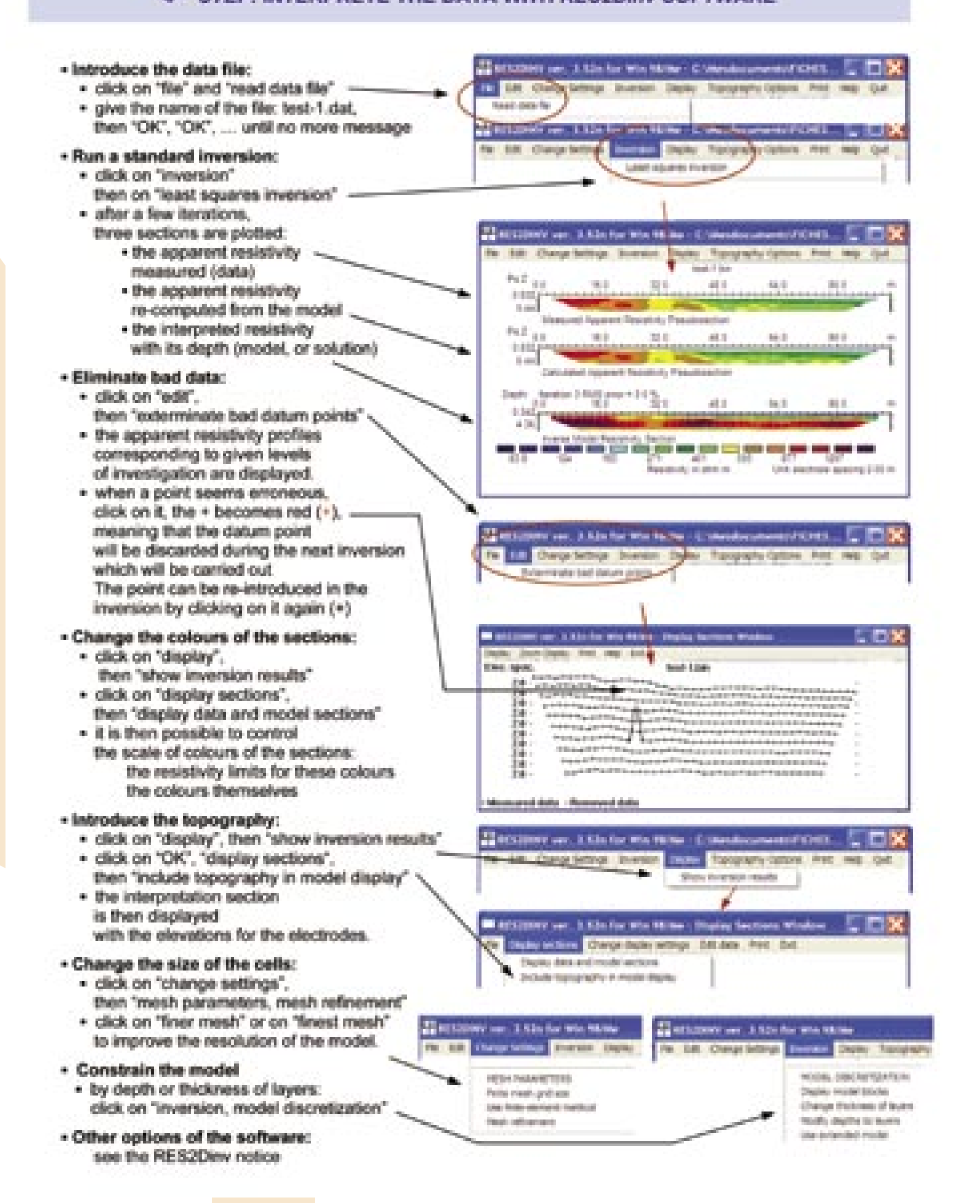
3rd STEP: TRANSFER AND PROCESS THE DATA WITH *PROSYS SOFTWARE*

- **TRANSFER THE DATA FROM THE SYSCAL TO THE PC:**
  - connect the serial cable to the SYSCAL and to the PC, run the PROSYS software
  - click on "communication", "data download", "SYSCAL V9", "multi-electrode mode", "OK"
  - switch the SYSCAL on, press the ***"SERIAL LINK"*** key, then the ***"ENTER"*** key on the SYSCAL
  - all the data files are transferred (1 mn / 500 readings)
  - at the end of the transfer, a name must be given to the 1st file transferred (test-1.bin), then to the second one, if any, etc. Data are displayed, one reading per line, with the co-ordinates (spa1, ...4) of the electrodes, and the values of resistivity (Rho), voltage (Vp), current (In), standard deviation- quality (Dev).
  - the SYSCAL can then be switched off.

- **CHECK AND PROCESS THE DATA BEFORE INTERPRETING THEM:**
  - click on "processing" and "filtering" to eliminate the data with high deviation (ex: only keep the readings which have a quality coeff. < 3%) or with a good Vp signal
  - click in a box to ignore ☐ or to validate ☒ a reading
  - click on "processing" and "modify spacing" to modify the abscissa (X value) of the electrodes of a file, if the data of this file have been obtained after a translation of a first sequence. Introduce the value of the translation (ex: 360m) for spa1, 2, 3, and 4 electrode co-ordinates.
  - if two files have to be merged, because they are successive segments of the same profile:
    - click on "file, open", give the name of the 1st file
    - then click on "file", "add", give the name of the 2nd file to merge with the 1st one
    - then click on "file", "save as" to give a name for the new combination file.
  - click on "processing" and "insert topography", to give Z spacing values for the electrodes; an interpolation function for the points located between two Z referenced electrode positions is available
  - click on the "Rho" of the table header to display the curves of the voltage measured at various depth levels. Check these values by validating the various levels selectively (clicking in the level boxes). Large spikes may represent bad data readings
  - click on "processing" and on "rho pseudo section" to display a color image of the apparent resistivity

- **MAKE A FILE READABLE BY THE INTERPRETATION SOFTWARE:**
  - click on "file", "export and save", "Res2Dinv / Res3Dinv", then click on "Res2Dinv"
  - confirm the name of the current file to export: test-1.bin
  - give a name to the file which will be read by Res2Dinv: test-1.dat

4th STEP: INTERPRETE THE DATA WITH *RES2Dinv SOFTWARE*



- **Introduce the data file:**
  - click on "file" and "read data file"
  - give the name of the file: test-1.dat, then "OK", "OK", ... until no more message
- **Run a standard inversion:**
  - click on "inversion" then on "least squares inversion"
  - after a few iterations, three sections are plotted:
    - the apparent resistivity measured (data)
    - the apparent resistivity re-computed from the model
    - the interpreted resistivity with its depth (model, or solution)
- **Eliminate bad data:**
  - click on "edit", then "exterminate bad datum points"
  - the apparent resistivity profiles corresponding to given levels of investigation are displayed.
  - when a point seems erroneous, click on it, the + becomes red (+), meaning that the datum point will be discarded during the next inversion which will be carried out. The point can be re-introduced in the inversion by clicking on it again (+)
- **Change the colours of the sections:**
  - click on "display", then "show inversion results"
  - click on "display sections", then "display data and model sections"
  - it is then possible to control the scale of colours of the sections: the resistivity limits for these colours the colours themselves
- **Introduce the topography:**
  - click on "display", then "show inversion results"
  - click on "OK", "display sections", then "include topography in model display"
  - the interpretation section is then displayed with the elevations for the electrodes.
- **Change the size of the cells:**
  - click on "change settings", then "mesh parameters, mesh refinement"
  - click on "finer mesh" or on "finest mesh" to improve the resolution of the model.
- **Constrain the model**
  - by depth or thickness of layers: click on "inversion, model discretization"
- **Other options of the software:**
  see the RES2Dinv notice

SYSCAL SWITCH

a range of multi-electrode resistivitymeters



SYSCAL Kid Switch

24 electrodes
spacing between cable take-out (std): 3m, 5m
power: 25 W – voltage: 200V
pre-programmed sequences of measurements

SYSCAL Junior Switch

24 - 48 or 72 electrodes
spacing between electrodes (std): 5m, 10m
power: 100 W – voltage: 400 V
programmable sequences of measurements



SYSCAL R1 Plus Switch

24 - 48 or 72 electrodes
spacing between electrodes (std): 5m, 10m
power: 200 W – voltage: 600 V
programmable sequences of measurements

SWITCH Plus unit

48 or 72 electrodes
accessory of SYSCAL Junior, R1 Plus Switch
for increasing the number of switched electrodes

SYSCAL Pro Switch

10 simultaneous channels for high speed readings
48 , 72 or 96 electrodes
spacing between electrodes (std): 5m, 10m
power: 250 W – voltage: 800 V
programmable sequences, 3D imaging



SWITCH Pro units

48, 72, 96 electrodes for SYSCAL Pro Switch upgrade



IRIS Instruments, 1, avenue Buffon, BP 6007, 45060 Orléans cedex 2, France
Tel: + 33 2 38 63 81 00 Fax: + 33 2 38 63 81 00 Email: iris@iris-instruments.com Web site: iris-instruments.com

Annexe C

Réalisation pas à pas d’un sondage

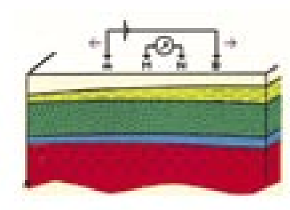
Les documents suivant proviennent également de la documentation technique éditée par Iris Instruments. Ils décrivent le principe de la technique de sondage et les caractéristiques techniques du Syscal pour la réalisation de telles mesures.

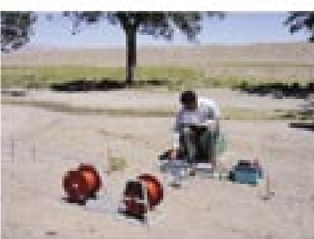
RESISTIVITY SOUNDING:

step-by-step operation of SYSCAL resistivitymeters

Principle of resistivity methods:

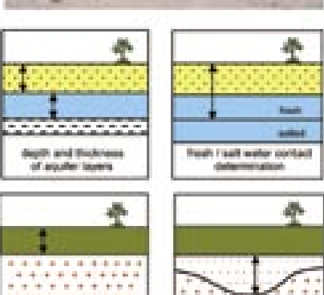
- *Transmit a current I between two grounded electrodes*
- *Measure a voltage V between two other ones*
- *Compute the apparent resistivity = K x V / I*
- *Move the electrodes to the next station and start a new reading*
- *Transfer the data to a PC to process them, and run an inversion software to interpret the results and get layer depths*
- *Correlate the values of the resistivity with the geological layers*



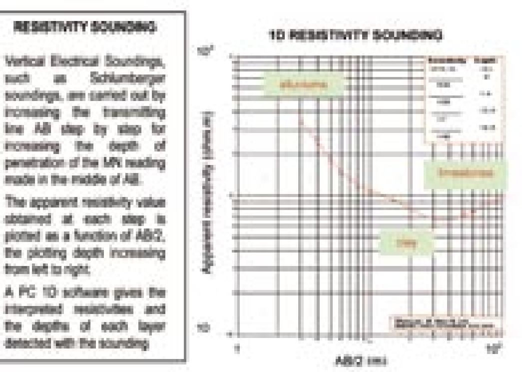


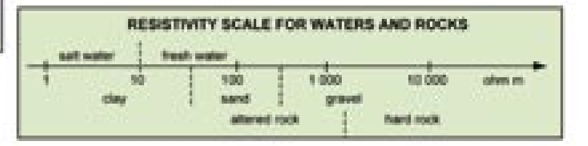
THE RESISTIVITY OF ROCKS MAINLY DEPENDS ON:

the quantity of water (matrix or fracture porosity)
the resistivity of the water
the content in clay material
the content in metallic minerals

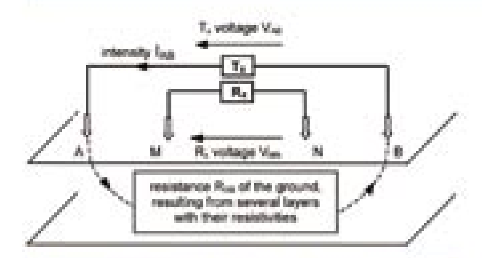


A few applications of vertical electrical soundings





RESISTIVITY SOUNDING: FIELD SET-UP



INTENSITY = Tx voltage / resistance

$$I_{AB} = V_{AB} / R_{AB}$$ (units: mA = V / kohm)

APPARENT RESISTIVITY = (coeff) x Rx voltage / intensity

$$Rho = K \times V_{MN} / I_{AB}$$ (units: ohm.m = m x mV / mA)

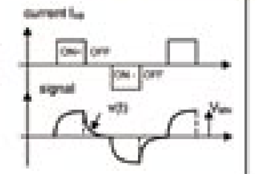
with $K = 2\pi / (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)$

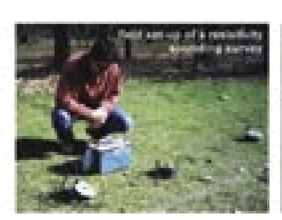
APPARENT CHARGEABILITY = $M = \int v(t)\, dt / V_{MN}\, \Delta t$

(unit of chargeability: mV / V, or per mil)

PRINCIPLE OF IP METHODS

The Induced Polarization (IP) phenomenon occurs with some types of minerals such as sulphide particles: when the pulse of current is switched off a decay curve is observed at the receiving electrodes. The M chargeability is a measurement of this decay







PACKING LIST FOR A RESISTIVITY SURVEY

MAIN EQUIPMENT

The equipment (resistivitymeter), with charged batteries

The PC computer for data transfer and interpretation

REELS AND ELECTRODES

Reels with electric wires for current transmission (AB line)

Reels with electric wires for voltage measurement (MN line)

Metallic stakes, with hammers

Cables and clips for wire to stake connection

OTHER ACCESSORIES

Measuring tapes (100m)

Tool kit box (pliers, screwdrivers, voltmeter, isolating tape)

Field note book and data sheets

External 12V car battery

SCHLUMBERGER SOUNDING DATA SHEET

area: site: VES n°:

operator: equipment: date:

AB/2 m	MN/2 m	V_{AB} V	I_{AB} mA	V_{MN} mV	RHO ohm.m	Q %	M mV/V	Mem #
2	0.5							
3	0.5							
4	0.5							
...	1							
5	0.5							
...	1							
6	1							
8	1							
...	2							
10	1							
...	2							
15	2							
...	5							

PRACTICAL MATTERS

The SYSCAL resistivitymeter is placed in the central part of the sounding.

The metallic electrodes have to be plugged into the ground as deeply as possible to decrease the ground resistance, for both the transmitting electrodes A, B, and the receiving electrodes M, N. A resistance of a few kohms is convenient (10 to 20 kohm max). When possible, water can be poured on the electrodes, or two electrodes can be set in parallel at each point to decrease this value.

The wires going from the SYSCAL to the A, B electrodes (up to several hundreds volts) have to be placed as far as possible from the wires going to the M, N electrodes (down to a few mV) to prevent insulation troubles.

The sounding starts by small values of the AB line (see table here above). For some values of the AB/2, two readings for different values of MN/2 have to be taken to check the lateral variations of the resistivity of the surface. Ideally, both resistivity values are identical.

The AB/2 values are logarithmically spaced (about 8 values par decade from 1 to 10, 10 to 100, 100 to 1000m, etc.)

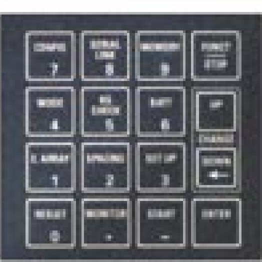
When the measurement becomes noisy (standard deviation Q greater than 5%), it is recommended to decrease the ground resistance of the A, B electrodes to drive more current, to increase the number of stackings, and to repeat several times the same reading.

The apparent resistivity values have to be plotted on a bilogarithmic paper sheet, to check how the new reading compares with respect to the previous ones, before moving the A, B electrodes to the next measuring point.

The data are stored in the internal memory of the equipment after each reading.

The depth of investigation is of the order of 20% of the length of the AB line.

RESISTIVITY SOUNDING: SYSCAL Junior, R1 Plus, and R2 OPERATION



general use of the keyboard (SYSCAL Junior, R1 Plus, R2):

FUNCT: to select a function
UP, DOWN: to move in a menu
ENTER: to validate a value

Main differences in operation between SYSCAL Junior, R1 Plus and SYSCAL R2

SYSCAL	Junior, R1 Plus	R2
converter	internal	external
battery	Rx: internal Tx: internal or external	Rx: internal Tx: external
electrode checking	between A and B plugs	between A-N, B-N, M-N
voltage fixing	in set up function: save energy, or 50, 100, 500 mV, corresponding to the V_{MN} required level	on the converter, turn the selector on the desired V_{AB} value

SP filtering

digital ranging — µProcessor

digital stacking: $\frac{signal}{noise} = \sqrt{stack\ \#}$

standard deviation: $\sqrt{\sum (\bar{M} - M_i)^2 / n}$

SUMMARY OF OPERATION

First reading :
connect wires, check batteries, select mode, times, stack number, quality factor, output voltage, electric array.

All readings:
check electrodes, introduce spacing AB/2, MN/2, press "start", wait for acquisition, read results, store in memory.

Check electrode connection:
Press **"Rs CHECK"** for Jr or R1 Plus:
Rs = 2.8 kohm (R_{AB})

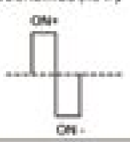
Press **"Rs CHECK"** for R2:
hit R_S button A: Rs = 2.4 kohm (R_{AN})
hit R_S button B: Rs = 3.6 kohm (R_{BN})
hit R_S button M: Rs = 1.9 kohm (R_{MN})

Check Rx internal battery:
Press **"BATT"**:
Rx battery = 8.9V (between 5 and 9V)
Capacity = 99% (between 0 and 100%)

Check Tx battery (Junior or R1 Plus):
- green light: the battery is OK,
- yellow / red: recharge the battery



FOR SCHLUMBERGER SOUNDINGS (no IP)



1- MODE: RHO mode (no IP)
/ON+, ON- current/

2- SET UP: Preset times, 500 ms
Range 1/249, stack min, 3, stack max, 10
Range 1/100, Q.E %, 3
for SYSCAL Jr and R1Plus: Set T, power to "save energy"

3- E. ARRAY: Schlumberger VES

4- SPACING: AB/2 = 10, MN/2 = 2,
Line = 1, Opt = 0

5- START: v = 26.4mV I = 13.5mA
q = 0% # 8 stacks

6- RESULT: U = 26.5mV
I = 13.3mA
(DOWN): RHO = 304.8 ohm.m Q = 0%

FOR MEMORY MANAGEMENT

for data storage:	*for data reading:*	*for memory clearing:*
MEMORY, Store, Enter	**MEMORY**, Read, Enter	**MEMORY**, Clear, 0, 9, -, 7

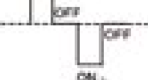
FOR DATA TRANSFER FROM SYSCAL TO PC

1- FROM PROSYS SOFT: communication, Data down load, SYSCAL version 9, Standard mode, First point, Last point, Download

2- FROM SYSCAL: Serial link, Baud rate, 9600, Enter, Down, Dump Hexa, Down, Block, Enter

3- FROM PROSYS: OK. After the transfer, give a name to the file which will contain the data (ex.: **test.bin**)

FOR DIPOLE DIPOLE PROFILINGS (with IP)



1- MODE: RHO and IP (with IP)
ON+, OFF, ON-, OFF current

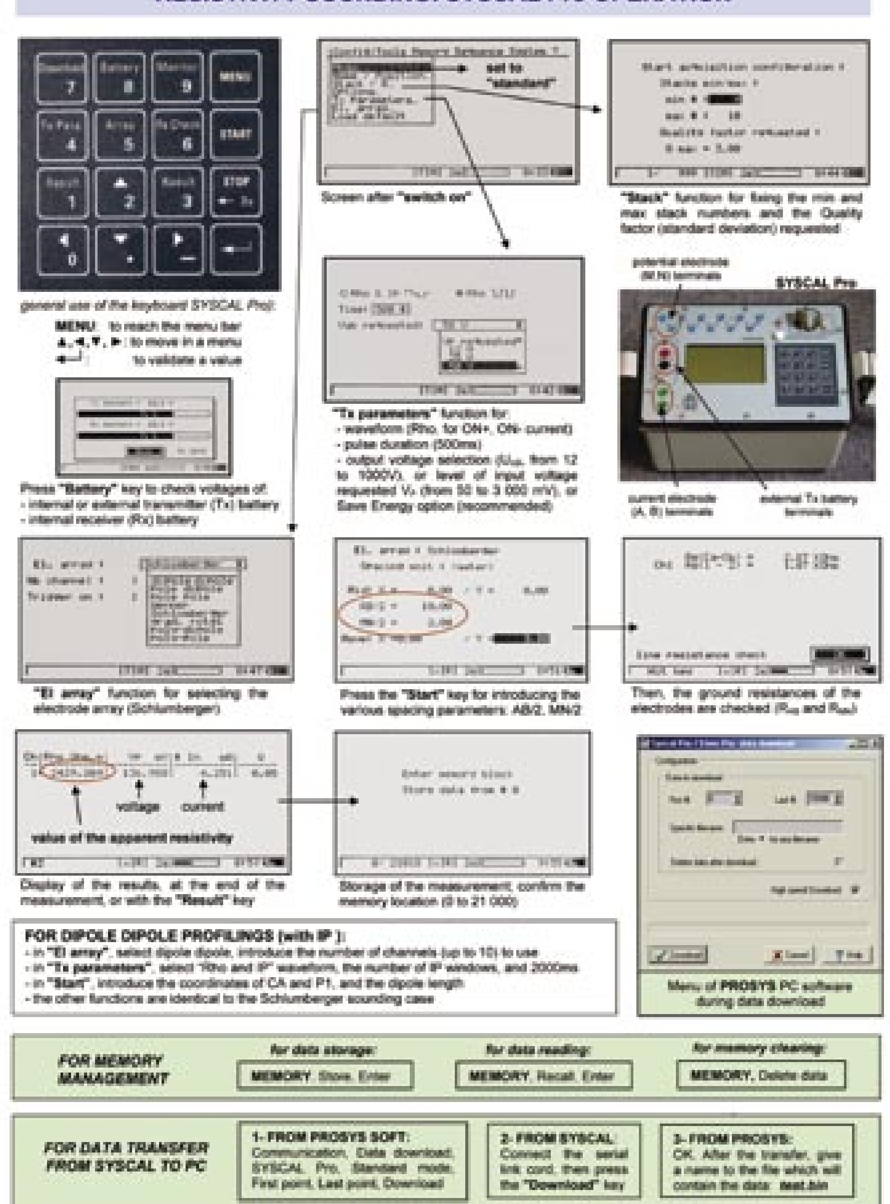
2- SET UP: Preset times, 2000 ms
Range 1/249, stack min, 5, stack max 20
Range 1/100, Q.E %, 3

3- E. ARRAY: Dipole Dipole

4- SPACING: XC = 10, XP = 20,
Dipole = 10 Line = 1

5- START: v = 26.4mV I = 13.5mA
m = 14 mV/V q = 0% # 8 stacks

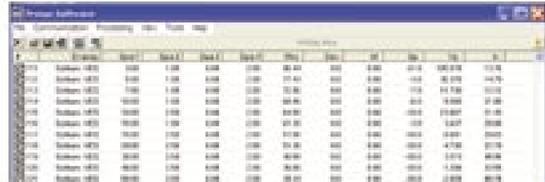
6- RESULT: U = 26.5mV
I = 13.3 mA
(DOWN): RHO = 304.8 ohm.m
Q = 0% M = 13.9 mV/V
(DOWN): M1 = 37.1 M2 = 25.1
M3 = 14.8 M4 = 7.3



RESISTIVITY SOUNDING: SYSCAL Pro OPERATION
set to "standard"
Screen after "switch on"
"Stack" function for fixing the min and max stack numbers and the Quality factor (standard deviation) requested
general use of the keyboard SYSCAL Pro:
MENU : to reach the menu bar
▲, ◄, ▼, ► : to move in a menu
↵ : to validate a value
"Tx parameters" function for:
- waveform (Rho, for ON+, ON- current)
- pulse duration (500ms)
- output voltage selection (U_{AB}, from 12 to 1000V), or level of input voltage requested V_P (from 50 to 3 000 mV), or Save Energy option (recommended)
potential electrode (M,N) terminals
SYSCAL Pro
current electrode (A, B) terminals
external Tx battery terminals
Press "Battery" key to check voltages of:
- internal or external transmitter (Tx) battery
- internal receiver (Rx) battery
"El array" function for selecting the electrode array (Schlumberger)
Press the "Start" key for introducing the various spacing parameters: AB/2, MN/2
Then, the ground resistances of the electrodes are checked (R_{AB} and R_{MN})
voltage
current
value of the apparent resistivity
Display of the results, at the end of the measurement, or with the "Result" key
Storage of the measurement; confirm the memory location (0 to 21 000)
FOR DIPOLE DIPOLE PROFILINGS (with IP):
- in "El array", select dipole dipole, introduce the number of channels (up to 10) to use
- in "Tx parameters", select "Rho and IP" waveform, the number of IP windows, and 2000ms
- in "Start", introduce the coordinates of CA and P1, and the dipole length
- the other functions are identical to the Schlumberger sounding case
Menu of PROSYS PC software during data download
FOR MEMORY MANAGEMENT
for data storage:
MEMORY, Store, Enter
for data reading:
MEMORY, Recall, Enter
for memory clearing:
MEMORY, Delete data
FOR DATA TRANSFER FROM SYSCAL TO PC
1- FROM PROSYS SOFT: Communication, Data download, SYSCAL Pro, Standard mode, First point, Last point, Download
2- FROM SYSCAL: Connect the serial link cord, then press the "Download" key
3- FROM PROSYS: OK. After the transfer, give a name to the file which will contain the data: test.bin

RESISTIVITY SOUNDING: 1D INTERPRETATION

<u>**First step:**</u> from the PROSYS software, open the file which includes the field data (**test.bin**), with the 'file, open' instructions: each reading corresponds to a line which includes AB/2 (spa1), MN/2 (spa2), Rho and the other parameters (deviation, voltage Vp, intensity In). To discard a line, if the reading appears too much noisy for instance, click on the corresponding line with the right mouse button and select 'discard' the first column icon of the line ☑ becomes ☐.

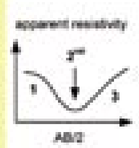


<u>**Second step:**</u> Always with the PROSYS software, create a file at the format of the WINSEV inversion software, using 'file, export' and save, Winsev' instructions and give a name to this new file: **test.ws3**

<u>**Third step:**</u> run the WINSEV software, load the **test.ws3** file with the 'file, read' instructions. Click on 'SEV model' to see the data points, then on 'Bilog' to carry out the inversion

Press '**fitting**' and '**auto**' to get the first inversion after the loading of the file.
Click on a line of the SEV model and on '**del line**' to delete a layer of the interpretation section
Click on a line of the SEV model and on '**ins line**' to insert a layer in the interpretation section
Click on a **resistivity** or a **thickness** or a **depth** case to modify the value, and key in the new value to introduce
Press '**compute**' to display the theoretical curve corresponding to the new value, and '**fitting**' to adjust the solution

EQUIVALENCE
From a theoretical point of view, several sets of layers with given thickness – resistivities can give the same apparent resistivity curves. This is known as the equivalence principle



In case of a 3 layer ground, if a **thin 2nd layer is less resistive** than the two other ones, only the ratio thickness / resistivity (known as the longitudinal conductance) characterizes this second layer: a 30m thick 20 ohm.m second layer gives the same apparent resistivity curve as a 15m thick 10 ohm.m layer (conductance 1.5 S).



If a **thin 2nd layer is more resistive** than the two other ones, it is the product thickness x resistivity (known as the transverse resistance) which is invariant: a 30m thick 20 ohm.m second layer gives the same apparent resistivity curve as a 15m thick 40 ohm.m layer (resistance 600 ohm.m²).

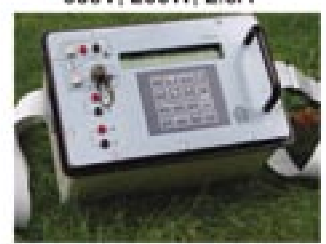
SYSCAL: A RANGE OF RESISTIVITYMETERS
FOR ELECTRICAL SOUNDINGS

SYSCAL Kid
200V, 25W, 0.5A



SYSCAL Junior
400V, 100W, 2.5A

SYSCAL R1 Plus
600V, 200W, 2.5A



SYSCAL R2
800V, 250W, 2.5A
800V, 1200W, 2.5A



SYSCAL Pro
1000V, 250W, 2.5A



PRODUCT name	power W	voltage V	current A	power converter	IP windows	receiving dipoles	display
SYSCAL Kid	25	200	0.5	internal	1	1	alpha num
SYSCAL Junior	100	400	1.2	internal	4	1	alpha num
SYSCAL R1 Plus	200	600	2.5	internal	4	1	alpha num
SYSCAL R2	250	800	2.5	DC/DC ext	4	1	alpha num
»	1200	»	»	AC/DC ext	»	»	»
SYSCAL Pro	250	1000	2.5	internal	20	10	graphical
»	500	1500	»	DC/DC ext	»	»	»

other electrical systems available for very deep resistivity and for IP surveys:
VIP transmitters (up to 3000V, 10 kW, 10A) with motor generators, and ELREC receivers



IRIS Instruments, 1, avenue Buffon, BP 6007, 45060 Orléans cedex 2, France
Tel: + 33 2 38 63 81 00 Fax: + 33 2 38 63 81 00 Email: iris@iris-instruments.com Web site: iris-instruments.com

Table des figures

Liste des tableaux

Références bibliographiques

Action contre la faim . (2006). *Eau, alimentation, hygiène pour les populations à risques* (2ème éd.). Hermann.

Chalikakis K. (2006). *Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection des ressources en eau dans les milieux karstiques.* Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France.

Chapellier D. (2000). *Prospection électrique de surface. Les Cours online de géophysique de l'Université de Lausanne - IFP (http://wwwig.unil.ch/cours/).* Université de Lausanne, Suisse.

Dahlin T. et Zhou B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* **52**, pp. 379 - 398.

Descloitres M., Ruiz L., Sekhar M., Legchenko A., Braun J.-J., Mohan-Kumar M. S. et Subramanian S. (2008). Characterization of seasonal local recharge using electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding. *Hydrological Processes* **22**(3), pp. 384 - 394.

D**ewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J.-C. et Krishnamurthy N. S.** (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology* **330**, pp. 260–284.

Durand V. (2005). *Recherche multidisciplinaire pour caractériser deux aquifères fracturés : les eaux minérales de Plancoët en contexte métamorphique, et de Quezac en milieu carbonaté.* Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France.

Frohlich R. K., Urish D. W., Fuller J. et O' Reilly M. (1994). Use of geoelectrical methods in groundwater pollution surveys in a coastal environment. *Journal of Applied Geophysics* **32**, pp. 139–154.

Hoareau J. (2009). *Utilisation d'une approche couplée hydrogéophysique pour l'étude des aquifères - Applications aux contextes de socle et côtier sableux.* Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble I).

Kirsch R. (2006). *Groundwater geophysics - A tool for hydrogeology* (1st ed.). Springer.

Larsson I. (1984). *Ground water in hard rocks.* Number 33 in Studies and reports in hydrology - International Hydrological Programme. Project 8.6. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France, pp. 228.

Loke M.-H. (2004). *Tutorial - 2D and 3D electrical imaging surveys.* Technical report, Geotomo Software.

Manjunatha B. R. et Harry N. A. (1994). Geology of western coastal Karnataka. In *Geo Karnataka*, Volume MGD Centenary Volume, Chapitre 8, pp. 109–116. Karnataka Assistant Geologists Association.

McNeill J. D. (1980). *Electrical conductivity of soils and rocks* (Technical Note TN-5). Technical report, Geonics Limited.

Urish D. W. et Frohlich R. K. (1990). Surface electrical resistivity in coastal groundwater exploration. *Geoexploration* **26**(4), pp. 267–289.

Vouillamoz J.-M., Chatenoux B., Mathieu F., Baltassat J.-M. et Legchenko A. (2007). Efficiency of joint use of MRS and VES to characterize coastal aquifer in Myanmar. *Journal of Applied Geophysics* **61**(2), pp. 142–154.

Vouillamoz J.-M., Legchenko A., Albouy Y., Bakalowicz M., Baltassat J.-M. et Al-Fares W. (2003). Localization of saturated karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery. *Ground Water* **41**(5), pp. 578–586.

Widdowson M. et Gunnell Y. (1999). Lateritization, geomorphology and geodynamics of a passive continental margin: the Konkan and Kanara coastal lowlands of western peninsular India. In M. Thiry et R. Simon- Coinçon (Eds.), *Palaeoweathering, Palaeosurfaces and Related Continental Deposits,* Volume 27 de Special Publication, pp. 245–274. International Association of Sedimentologists.

Wilson S. R., Ingham M. et McConchie J. A. (2006). The applicability of earth resistivity methods for saline interface definition. *Journal of Hydrology* **316**, pp. 301–312.



ACF - INTERNATIONAL

CANADA
7105 Rue St-Hubert, Bureau 105
H2S 2N1 Montréal, QC, Canada
E-mail: info@actioncontrelafaim.ca
Tel : +1 514 279 4876
Fax : +1 514 279 5136
www.actioncontrelafaim.ca

ESPAGNE
C/Caracas 6, 1°
28010 Madrid, España
E-mail: ach@achesp.org
Tel : +34 91 391 53 00
Fax : +34 91 391 53 01
Web : www.accioncontraelhambre.org

ETATS-UNIS
247 West 37th, Suite #1201
New York, NY 10018 USA
E-mail: info@actionagainsthunger.org
Tel : +1 212 967 7800
Fax : +1 212 967 5480
www.actionagainsthunger.org

FRANCE
4 rue Niepce
75662 Paris, cedex 14, France
E-mail: info@actioncontrelafaim.org
Tel : +33 (0) 1 43 35 88 88
Fax : +33 (0) 1 43 35 88 00
Web : www.actioncontrelafaim.org

ROYAUME-UNI
First Floor, rear premises,
161-163 Greenwich High Road
London, SE10 8JA, UK
E-mail : info@aahuk.org
Tel : +44 208 293 6190
Fax : +44 208 858 8372
Web : www.aahuk.org





